

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ

ФГБОУ ВО БРЯНСКИЙ ГАУ

Купреенко А.И., Исаев Х.М., Ченин А.Н.

Применение гелиосушилок зерна в условиях Брянской области: теория и результаты

Монография



Брянская область, 2020

УДК 631.365.22(470.333)(035.3)

ББК 31.63

К92

Купреенко, А. И. Применение гелиосушилок зерна в условиях Брянской области: теория и результаты: монография / А. И. Купреенко, Х. М. Исаев, А. Н. Ченин. – Брянск: Изд. Брянский ГАУ, 2020. - 174 с.

ISBN 978-5-88517-350-6

В монографии изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований гелиосушилок зерна барабанного и камерного типа в условиях Брянской области. Приведены критерии определения конструктивно-режимных параметров гелиосушилок. Даны практические рекомендации по оптимальным конструктивным параметрам и режимам работы гелиосушилок зерна.

Для специалистов сельскохозяйственного производства, научных работников и студентов учреждений высшего образования.

Рецензенты:

- директор инженерного факультета ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ д.т.н., доцент Павлушин А.А.

- профессор кафедры технических систем в агробизнесе, природообустройстве и дорожном строительстве ФГБОУ ВО Брянский ГАУ д.с.-х.н., профессор Ожерельев В.Н.

Рекомендовано к изданию методической комиссией инженерно-технологического института Брянского ГАУ, протокол №3 от 23 октября 2020 года.

ISBN 978-5-88517-350-6

© Брянский ГАУ, 2020

© Купреенко А.И., 2020

© Исаев Х.М., 2020

© Ченин А.Н., 2020

Введение

Наращивание производства зерна является одной из важнейших задач устойчивого развития продовольственного рынка страны, а также обеспечения ее продовольственной безопасности. Эта задача должна решаться не только повышением валового сбора урожая зерновых, но и обеспечением качества зерна, ведь известно, что качество зерна - второй урожай.

В последние годы Брянская область значительно увеличила площади посевов под зерновые культуры. При этом рост урожайности позволил получить в 2019 г. 1,8 млн т зерна, в 2020 г. планируется получить порядка 2,5 млн т [91].

Производство зерна сезонно, потребление его круглогодично, поэтому очень важно создать необходимые условия для его длительного хранения [118].

Как известно, в свежесобранном зерне продолжается процесс послепосевочного дозревания. К моменту уборки зерно еще не достигает полной физиологической зрелости и не обладает высокими технологическими свойствами. Правильно организованная сушка позволяет ускорить этот процесс, а также способствует выравниванию влажности и степени зрелости зерновой массы, улучшению внешнего вида и технологических свойств зерна.

В процессе сушки возможно также ухудшение качества зерна вследствие потери всхожести, подгорания, снижения хлебопекарных свойств муки, растрескивания.

Сушка, являясь наиболее важным технологическим процессом послепосевочной обработки зерна, в тоже время является и наиболее энергозатратным процессом.

Для досушивания зерна применяются сушилки различных типов со средним расходом жидкого топлива 100 кг/ч или газа 70 кг/т и установленной мощности электродвигателей порядка 50 кВт.

По своей природе зерно является коллоидным, а по структуре капиллярно-пористым телом со сложным химическим составом. При сушке зерна большое значение имеет не только температура нагрева зерна, но и продолжительность воздействия тепла. Важнейшей характеристикой зерна являются его теплофизические свойства. Исследования теплофизических характеристик единичного зерна и зернового слоя показали, что значения коэффициентов тепло- и теплопроводности для единичного зерна значительно отличаются от показателей для слоя того же зерна. Поэтому для быстрого нагрева всей массы зерна необходимо, чтобы в сушильной установке обеспечивался бы нагрев каждого отдельного зерна [16, 55].

Первые русские исследователи процесса сушки зерна (И. Чернопятков, 1867 г., Н. Румянцев, 1896 г.) обратили внимание на то, что зерно под действием высоких температур теряет всхожесть. Ими также было замечено, что высокая температура особенно пагубно действует на сырое зерно. По мере подсыхания зерна высокие температуры менее опасны.

Наиболее обычным повреждением зерна при его искусственной высокотемпературной сушке является образование трещин, вызываемое высокой скоростью сушки. Такое повреждение проявляется в образовании трещин на поверх-

ности зерна или внутренних трещин. При помоле зерна пшеницы с трещинами снижается выход муки высшего сорта. Для предупреждения образования трещин следует контролировать как температуру сушильного агента, так и величину снижения влажности зерна за один пропуск через сушилку. При высокой скорости сушки зерна внутренние трещины образуются в эндосперме, что приводит к его дроблению при транспортировке. Образование трещин возрастает при увеличении температуры сушильного агента и подачи воздуха [24, 25, 35].

В последние годы ряд объективных причин, а именно, рост населения планеты, цен на нефтепродукты и природный газ (из-за усиливающегося энергетического кризиса и возрастающего дефицита энергии, отрицательных экологических последствий от работы тепловых и атомных электрических станций) обусловили интерес ученых к работам по использованию возобновляемых источников энергии и, в первую очередь, солнечной энергии. Разработка энергетических установок, использующих природные источники энергии, активно проводится во всех развитых странах, в т.ч. и в нашей стране [19, 120].

Среди возобновляемых источников энергии одно из наиболее значимых мест занимает солнечная энергия, использование которой обеспечивает экологическую чистоту при возможности её применения практически во всех частях земного шара.

Одна из перспективных областей применения солнечной энергии в сельскохозяйственном производстве - послеуборочная сушка зерна.

При использовании существующих установок, на сушку зерна приходится от 85 до 97% общих затрат энергии на его обработку. В целом по стране на сушку расходуется около 12% используемого топлива. Расчёт показывает, что стоимость только топлива, расходуемого на сушку зерна, составляют около 10% цены реализации зерна.

Использование высокотемпературных сушилок целесообразно при высокой влажности свежесобранного зерна - более 20% [46, 60, 66, 120].

Высокотемпературные сушилки, обладая большой производительностью, имеют ряд недостатков, делающих их применение в небольших хозяйствах при малых объемах производства зерна неэффективным. Однако в стране имеется около 260 тыс. крестьянских (фермерских) хозяйств, в каждом из которых собирают от 3,5 до 106,0 т. зерна. Эти хозяйства нуждаются в зерносушилках небольшой производительности, которые обеспечивали бы при минимальных затратах энергии соответствующее качество высушенного зерна [60].

Обычной практикой небольших коллективных, крестьянских (фермерских) хозяйств является уборка зерна после того, как его влажность на колосе достигнет 16...17% и ниже. Хозяйства, выжидая достижения данной влажности зерна на колосе, тем самым теряют время, приходящееся на оптимальные сроки уборки, и теряют зерно.

Естественная сушка в гелиосушилках, в данном диапазоне влажности, не уступает, а иногда и превосходит искусственную сушку при отсутствии затрат на топливо и создании щадящего режима сушки как для зерновой массы в целом, так и для единичного зерна в отдельности.

Важным направлением в обеспечении устойчивого развития сельского

хозяйства является переход на импортозамещение в производстве семян овощных культур. Объемы производства этих семян относительно зерна колосовых культур значительно меньше и, в связи с этим, актуальность решения задач их малозатратной, энергосберегающей, высококачественной послеуборочной сушки очень высока и является еще одним направлением в использовании гелиосушилок.

Процессы сушки и хранения зерна освещены в работах Авдеева А.В., Акулича П.В., Атаназевича В.И., Вобликова Е.М., Гинзбурга А.С., Голубковича А.В., Жидко В.И., Журавлёва А.П., Елизарова В.П., Колесова Л.В., Крауспа В.Р., Курдюмова В.И., Курочкина А.А., Лурье А.Б., Лыкова А.В., Михайлова Ю.А., Павлова С.А., Павлушина А.А., Птицына С.Д., Рудобашты С.П., Сажина Б.С., Семенова В.Ф., Цугленка Н.В. и др. [1, 2, 12, 27, 34, 39, 45, 50, 53, 64, 67, 68, 69, 70, 82, 85, 89, 101, 104, 106, 111, 116, 124, 126, 128].

Вопросы снижения энергоемкости сельского хозяйства, в т.ч. сушкой сельскохозяйственного сырья в гелиоустановках отражены в работах Алдошина Н.В., Байдакова Е.М., Горбачева И.В., Купреенко А.И., Надилова Н.А., Омарова Ш.К., Севернева М.М., Скороходова А.Н., Стребкова Д.С., Федоренко В.Ф. и др. [3, 16, 17, 19, 33, 42, 93, 97, 98, 108, 122].

Теория сушки получила значительное развитие в работах отечественных ученых А.С. Гинзбурга, П.Д. Лебедева, А.В. Лыкова, Г.К. Филоненко, а также зарубежных ученых - О. Кришера, В. Мальтри, Л. Отена, Л. Пабиса, Э. Петке, Б. Шнайдера и др. [87, 92, 93, 114, 117, 129].

Вопросами влияния режимов сушки на качество зерна, повышения эффективности процесса сушки занимались В.И. Анискин, В.И. Жидко, Б.А. Карпов, В.Р. Краусп, А.Б. Лурье, Н.И. Малин, С.К. Манасян, А.Е. Юкиш и др. [90, 99, 133, 139].

Однако большинство данных работ посвящено вопросам процесса сушки в высокотемпературных сушилках, характеризующихся стабильностью и управляемостью параметров сушильного агента и незначительным влиянием колебаний параметров окружающей среды на процесс сушки.

Поэтому вопросы повышения эффективности сушки зерна, обеспечения стабильности процесса сушки при неустойчивых погодных условиях, снижение материалоемкости остаются актуальными задачами совершенствования гелиосушильных установок.

Существенным недостатком процесса сушки является его большая энергоемкость. В промышленных производствах энергозатраты на сушку от общего расхода энергии составляют до 15% и более [2]. Еще более высоки затраты энергии на сушку в зарубежных странах – от 17 до 25% [136, 137, 139].

Энергоемкость процесса напрямую зависит от применяемого способа сушки и совершенства сушильной установки. Теоретически необходимое количество теплоты для испарения 1 кг воды составляет 2250...2700 кДж/кг. С учетом того, что коэффициент полезного действия сушильных установок составляет от 12 до 80% энергозатраты на испарение воды на практике значительно выше. В зерносушилках удельный расход теплоты составляет в среднем 3500...5000 кДж/кг [2].

Для снижения энергоемкости процесса сушки применяют методы технологические (снижение начальной влажности материала механическим обезвоживанием, выпариванием и т.п.; изменение размеров, структуры материала измельчением, вспениванием и др.) и теплотехнические, направленные на совершенствование способов подведения теплоты, оптимизацию рабочих режимов установки, совмещение с сушкой других технологических процессов и т.д. Однако использование этих методов хотя и уменьшает энергоемкость самого процесса сушки, но повышает энергоемкость подготовительных и сопутствующих технологических процессов.

К недостаткам высокотемпературных зерносушилок помимо больших капитальных вложений и высоких энергозатрат следует отнести также попадание в зерно, окружающую среду продуктов горения топлива, неравномерный нагрев зерновой массы, образование трещин вследствие «теплового шока», снижающих посевные и технологические качества зерна [7, 25, 105, 117].

Одним из перспективных направлений снижения энергоемкости и повышения экологичности процесса сушки зерна является использование гелиосушилок зерна [90, 92]. В нашей стране технически возможные ресурсы ВИЭ составляют порядка 4,6 млрд. т условного топлива в год, а экономически оправданный потенциал около 270 млн. т условного топлива, что соответствует около 25% годового расхода энергоресурсов в стране [15, 19, 138, 140, 142]. При этом экономическая привлекательность ВИЭ постоянно растет из-за неизбежного роста затрат на добычу традиционных энергоресурсов и сопутствующих этому экологических проблем [135].

Энергоресурсы солнца, составляющие на территории России $24,4 \cdot 10^{15}$ кВт·ч/год, в 12 тыс. раз превышают имеющееся потребление энергии. На один кВт установленной мощности при использовании энергии Солнца годовая экономия традиционных энергоносителей составляет от 0,07 до 0,09 т условного топлива [110].

В пределах $50 \dots 60^\circ$ северной широты европейской части страны (Брянская область расположена в границах $52 \dots 54^\circ$ северной широты) для сушки зерна в гелиоустановках солнечной энергии вполне достаточно, т.к. в период уборки в течение месяца наблюдается всего 2...3 пасмурных дня, около 8...10 ясных и порядка 15...20 со средней облачностью дней.

При средней облачности среднее суточное значение суммарной радиации в летний период на горизонтальную поверхность составляет 18,1, при ясной погоде - 27,7 МДж/м². В ясный день летом на горизонтальной поверхности интенсивность суммарной радиации составляет 0,25...0,8, при средней облачности - 0,15...0,55, в пасмурные дни - 0,13...0,27 кВт/м² [19, 143].

Простой гелиоколлектор даже при невысокой интенсивности инсоляции обеспечивает подогрев теплоносителя на 3...5 °С, что снижает относительную влажность воздуха на 15...25 % [110].

Гелиосушилки имеют сравнительно невысокую производительность, однако не уступают напольным сушилкам, использующим электрокалориферы, а зачастую и превосходят их при отсутствии затрат на топливо [100].

Еще одним достоинством гелиосушилок является отсутствие высокой

температуры в сушильной камере, что исключает неравномерность нагрева, а также перегрева зерновой массы, приводящего к потере зерном своих технологических свойств.

Поэтому сушку элитных семян зерновых и овощных культур целесообразно проводить в гелиосушилках. Также использование гелиосушилок целесообразно для селекционно-семеноводческих станций, крестьянских, фермерских хозяйств, т.е. там, где требуется сушить малые партии зерна, не допуская попадания семян одной партии в другую.

Глава 1 Снижение энергозатрат в технологии сушки зерна

1.1 Технологические особенности качественной сушки зерна

Зерно - живой организм. В нем протекают биохимические процессы, интенсивность которых зависит от влажности.

Государственные стандарты выделяют четыре состояния семян зерновых культур: сухие, средней сухости, влажные и сырые [26, 38, 40].

Сухое зерно почти не имеет свободной влаги и находится в состоянии покоя или анабиоза. Жизненные процессы в нем полностью не останавливаются, но протекают в замедленном темпе, необходимом лишь для поддержания жизни клеток зародыша. Такое зерно может храниться длительное время. С появлением свободной влаги физиологическая активность (жизнедеятельность) зерна значительно увеличивается. Во влажном и, особенно, сыром состоянии зерно интенсивно дышит, в нём быстро размножаются хлебные вредители (клещ, долгоносик и др.), которые разрушают зерна и ускоряют процесс самосогревания. В процессе дыхания происходит распад углеводов, составляющих основную массу питательных веществ зерна, и выделяются углекислый газ, вода, этиловый спирт и значительное количество теплоты. Вследствие этого зерно теряет массу. Потери сухих веществ в процессе дыхания могут составить от 0,1 до 0,2% в сутки, а иногда и более.

Для устранения потерь сухих веществ зерна необходимо сразу же после уборки снизить интенсивность его дыхания, которая зависит главным образом от влажности и температуры зерновой массы. Интенсивное дыхание зерна требует наличия в нем свободной влаги. Поэтому влажность зерна, при которой появляется свободная влага, называют критической. У семян пшеницы, ржи, овса, ячменя и гречихи она находится в пределах 14,5...15,5%, кукурузы и проса - 12,5...13,5%, гороха, фасоли, вики и кормовых бобов - 15...16%, а для семян высокомасличного подсолнечника составляет всего лишь 6...8% [18, 60, 106, 111]. Именно поэтому большое значение приобрела сушка, как технологический процесс, обеспечивающий увеличение стойкости зерна при хранении, ускорение послепосевного дозревания, улучшение технологических и семенных качеств зерна.

Зерна различных культур имеют свои особенности сушки, обусловленные их строением и биолого-технологическими свойствами [13].

Так, при сушке пшеницы не допускается уменьшение содержания клейковины и ухудшение ее качества, которое может достигать от 1 до 25% и более. Скорость сушки у ржи меньше, чем у пшеницы, поскольку влага в зерне ржи более прочно связана с сухим веществом.

Овес, ячмень и другие пленчатые культуры выдерживают более жесткие режимы сушки, т.е. более высокую температуру теплоносителя, хотя допустимые температуры нагрева самого зерна примерно те же, что и пшеницы и ржи. За счет быстрого высыхания оболочек, влажность у пленчатых культур снижается несколько быстрее, чем у голозерных [8].

При сушке проса, риса, гречихи не допускается снижение выхода крупы и

увеличение количества битых и ошелушенных зерен. При сушке ячменя и кукурузы продовольственного и кормового назначения не допускается денатурация белка. При сушке семян подсолнечника должно быть гарантировано полное сохранение качества масла. Температуру агента сушки ограничивают требования пожарной безопасности. При повышении температуры агента подсолнечник может загораться, хотя термоустойчивость семян этой культуры характеризуется более высокими значениями. Специалисты университета в Северной Дакоте (США) лузгу подсолнечника сравнивают по способности к возгоранию с каменным углем, а подсолнечное масло - с дизельным топливом [4, 54, 65]. Поэтому температуру агента сушки при сушке подсолнечника продовольственного назначения рекомендуется поддерживать в пределах 86...160 °С (нагрев зерна до 60 °С), а семенного назначения - 70...80 °С (нагрев зерна до 43 °С) [22].

Сушка горчицы, рапса, семян травы (клевера, люцерны) имеет свои особенности по сравнению с сушкой семян подсолнечника из-за их различных физико-механических свойств. По характеру протекания процесса сушки мелкосеменные культуры сходны между собой, и их можно сушить при одном и том же режиме. При этом уменьшают подачу воздуха и агента сушки в сушильную и охладительную шахты. Влажность семян после сушки не должна превышать 8%.

При сушке семенного зерна нужно обеспечить сохранение зерна как живого организма без ухудшения семенных достоинств. Процесс сушки должен способствовать сокращению сроков послеуборочного дозревания, увеличению выхода муки и крупы высоких сортов, улучшению цвета зерна, повышению его натурности, уменьшению содержания сорной примеси [8].

Предельно допустимую температуру нагрева, при которой сохраняется качество зерна в соответствии с его назначением (продовольственное, кормовое, семенное), отождествляют с понятием «термоустойчивость», которую следует рассматривать как комплексный критерий, включающий и биологическую устойчивость к тепловому воздействию и механическую сопротивляемость внутренним разрушающим силам, возникающим под действием градиентов температуры и влагосодержания. Термоустойчивость зерна зависит от его влажности, состояния белкового комплекса, степени зрелости зерна, а также от технологической схемы сушки, температуры и скорости агента сушки.

Обычно влияние нагрева на сохранность качества высушиваемого зерна рассматривается во взаимосвязи трех основных факторов: влажности зерна, температуры и продолжительности нагрева. Исследованиями установлено, что термоустойчивость зерна зависит и от влагосодержания агента сушки [119].

При сушке зерна большое значение имеет не только температура нагрева зерна, но и продолжительность воздействия теплоты [38, 39, 41, 58, 71, 88, 95].

Скорость сушки является одним из параметров режима сушки, влияющих на качество зерна. При искусственной сушке зерна, из-за её высокой скорости, часто происходит его повреждение, которое выражается в появлении трещин на поверхности самого зерна либо внутри него, что, в свою очередь, негативно сказывается на качестве муки, перемалываемой из зерна с трещинами. Чем выше температура сушильного агента и больше подача воздуха, тем больше трещин образуется на поверхности зерна. Установлено, что большинство трещин в

зерна образуется при сушке в диапазоне влажности 19...14%, однако, если сушка начинается при более высокой влажности, то число трещин увеличивается в несколько раз. Быстрое охлаждение высушенного зерна способствует увеличению количества трещин. Образование трещин уменьшается при низкой скорости сушки и охлаждении высушенного зерна в силосах с вентилированием [43].

Оптимальная температура для сушки зерна напрямую зависит от его влажности, т.е., чем выше влажность зерна, тем ниже должна быть температура его сушки. Интенсивное перемещение влаги внутри зерна способствует образованию и развитию микротрещин. Чем выше скорость перемещения влаги, тем выше интенсивность образования трещин [50, 51].

Появляющиеся в процессе сушки трещины могут выходить на поверхность, при этом могут быть повреждены алейроновый слой, а затем и оболочки. Если трещины и нарушают алейроновый слой, служащий хранилищем питательных веществ для зародыша, то посевные качества зерна при этом не снижаются. Однако технологические, крупяные достоинства зерна в этом случае ухудшаются, так как алейроновый слой и оболочки не могут служить надежной защитой ядра от раскалывания при переработке. У семян зернобобовых, кукурузы и риса при жестком режиме сушки сначала на оболочке, а затем и в самом зерне появляются трещины. Зерно с трещинами плохо хранится и непригодно для посева. Поэтому семенное зерно этих культур сушат при более низких температурах, отчего производительность сушилки при сушке риса в 1,5 раза, а при сушке кукурузы, гороха, фасоли, люпина в 2...3 раза ниже, чем при сушке пшеницы [8].

Предельно допустимую температуру агента сушки выбирают, исходя из значений предельно допустимой температуры нагрева зерна [87].

В зависимости от вида зерна и его дальнейшего предназначения, влияние режимов сушки зерна на его качество может быть различным. Так, например, кукурузное зерно, высушенное при высокой температуре, теряет свою всхожесть, но, тем не менее, его кормовые качества остаются неизменными.

Пшеничное зерно, высушиваемое при довольно высокой температуре, определённым образом, закаляется, в результате чего затрудняется его размол. Также, сушка пшеничного зерна при повышенной температуре снижает хлебопекарные свойства муки, смолотой из него. А в кукурузе, высушенной таким образом, тяжело отделяется крахмал.

В связи с тем, что белки зародыша более чувствительны к нагреву, чем белки эндосперма, предельная температура нагрева семенного зерна в зерносушилках всех типов ниже, чем продовольственного. Повышение температуры нагрева зерна имеет определенные пределы, за которыми наблюдается резкое ухудшение качества зерна - уменьшение всхожести и энергии прорастания, уменьшение качества и количества клейковины, уменьшение выхода крупы и т.п. Согласно действующей инструкции максимальный нагрев семян пшеницы, ржи, ячменя, подсолнечника, гречихи, проса, овса не должен превышать 40 °С, а температура агента сушки - 70 °С. При сушке бобовых культур и риса-зерна нагрев семян не должен превышать 35 °С, а температура агента сушки - 60 °С

[87]. Высушенное таким образом зерно не подвергается трещинам и является менее хрупким.

Предельно допустимую температуру нагрева зерна семенного назначения устанавливают, исходя из условия сохранения энергии прорастания и его всхожести [62]. Величину предельно допустимой температуры нагрева зерна устанавливают исходя из биохимических изменений, происходящих в белковом комплексе зародыша и эндосперма. Эти изменения характеризуются степенью денатурации белка. Степень денатурации белков - сложная функция температуры нагрева зерна, его влажности, времени действия температуры, она зависит от природы белка. Количественная сторона воздействия этого комплекса факторов была определена скоростью денатурации, пропорциональной концентрации воды (влажности зерна) и температуре нагрева зерна. Так, с повышением температуры зерна на 10°C (при постоянной влажности) скорость денатурации увеличивается в 2...4 раза, с повышением влажности при неизменной температуре скорость денатурации также увеличивается, причем, увеличение влажности на 3...4 % эквивалентно увеличению температуры на 10°C . В начальной стадии денатурации наблюдается процесс обратимости денатурации (процесс ренатурации). Благодаря этому, при длительном хранении зерна растворимость альбуминов и глобулинов, а также энергия прорастания и всхожесть частично или полностью восстанавливаются [8].

Для определенной культуры устанавливают границу нулевой степени денатурации. Так, при сушке зерна продовольственной пшеницы денатурация белков эндосперма (глиадаина и глютеина) на 1...2% не вызывает изменений хлебопекарных свойств, а денатурация глиадина на 8...9% сопровождается резким изменением ее физических свойств (комочки клейковины плохо слипаются, гидратационная способность падает, выход сухой и сырой клейковины резко снижается). При денатурации глиадина свыше 15% клейковина не отмывается.

Для культур, имеющих плотную оболочку (бобовые), предельно допустимую температуру нагрева зерна выбирают исходя из условий сохранения целостности оболочек и ядра, а для крупяных культур (гречихи, проса, риса) - обеспечения высокого выхода и качества крупы [8].

Так, термоустойчивость (способность зерна сохранять свои природные качества при нагреве) зерна пшеницы влажностью 7...8% при нагреве до 70°C не теряет всхожести, но то же зерно влажностью 20% уже при $40...45^{\circ}\text{C}$ теряет всхожесть. На термоустойчивость зерна значительное влияние оказывает продолжительность нагрева. При кратковременном температурном воздействии зерно может выдержать более высокую температуру.

Температура нагрева зерна и температура агента сушки взаимосвязаны, т.е. при сушке поддерживается такая температура агента, при которой достигается необходимый нагрев зерна [12, 18, 20, 80, 121].

При сушке крупяных и бобовых культур предельно допустимую температуру нагрева зерна выбирают, исходя из условий сохранения целостности плодовой оболочки, а также обеспечения высокого выхода качественной крупы. Запрещается пересушивать зерно ниже допустимых пределов.

Оператор сушилки обычно контролирует температуру сушильного агента, но от нее зависит температура зерна, которая определяет его качество в за-

зависимости от назначения. Различные диапазоны температуры могут быть установлены для зерна, используемого для семенных и кормовых целей, для мукомольной промышленности [22, 70].

Зависимость между температурой сушильного агента и температурой зерна сложная. Зерно быстро нагревается за счет тепла сушильного агента. Когда зерно подвергается действию больших объемов воздуха, как, например, при сушке в тонком слое или при сушке зерна, полностью подвергающегося воздействию воздуха, температура зерна быстро приближается к температуре сушильного агента. В сушилке, где не происходит перемешивания зерна (шахтная сушилка непрерывного или периодического действия) температура слоя зерна, следующего за тем слоем, в который поступает нагретый воздух, быстро приближается к температуре этого воздуха. Температура воздуха, проходящего через зерно, быстро падает по мере испарения влаги. Поэтому в сушилках с поперечным движением сушильного агента имеется большой перепад температур. Конечная температура зерна и его конечная влажность - средние величины, получаемые при перемешивании зерна, происходящем при его выпуске из сушилки [87].

Начальная влажность считается одним из главных признаков качества, т.к. содержание воды в зерне необходимо знать на всех этапах его производства, обработки, сушки, хранения и переработки. От содержания влаги в зерне зависят затраты энергии на его обработку и переработку, выход готовой продукции и ее качество.

При увеличении температуры сушильного агента сверх допустимой величины не наблюдается значительной интенсификации процесса влагопереноса. Дело в том, что сушильный агент воздействует лишь на оболочку зерна, тем самым, удаляя лишь поверхностную влагу, а внутренняя влага остается в зерне (при нагреве внутренняя влага, постепенно испаряется, но процесс ее испарения растянут во времени), тем самым, затрудняя испарение влаги из зерновки. Постепенно внутренняя связанная влага «подходит» к поверхности зерновки и испаряется с ее поверхности. Для обеспечения интенсивного влагообмена между сушильным агентом и зерновкой необходимо механически воздействовать на зерновую массу, находящуюся в сушильной камере. Например, механически перемешивать зерно в процессе сушки для интенсификации процесса влагообмена и снятия полей влагонапряжения, возникающих при длительной тепловом воздействии сушильного агента на зерновую массу. Тем самым может быть достигнут однократный пропуск зерна через сушилку, использующую данный технико-технологический прием.

Большая начальная влажность отрицательно сказывается на интенсивности процесса сушки зерна, увеличивая продолжительность и расходы на сушку зерна. Постепенное снижение влажности и доведения ее до кондиционной является основной задачей процесса сушки [87].

Анализ процесса сушки зерна позволяет сделать следующее заключение. Чем выше начальная влажность зерна, тем больше скорость сушки и тем короче этот период. Это объясняется тем, что вначале испаряется поверхностная влага. При этом влага из внутренних слоев зерна постоянно поступает к внешним слоям. Интервал времени, когда количество влаги, испаренной с поверхности зер-

на, равно количеству влаги, подведенной с внутренних слоев, является первым периодом сушки. Однако такое равновесие быстро нарушается, т.е. влага внутренних слоев не успевает подойти к внешней поверхности зерновки. Наступает второй период убывающей скорости сушки и углубления зоны испарения вовнутрь зерна. Если в период убывающей скорости сушки прекратить подачу агента сушки и осуществить выдержку зерна, то влага снова подойдет из внутренних слоев к внешней поверхности, а при повторной сушке снова будет наблюдаться первый период постоянной скорости сушки [36, 52].

В период внутренней диффузии влаги интенсивность испарения влаги не зависит от температуры агента сушки и практически полностью определяется законами внутреннего перемещения влаги [62].

На основе вышеизложенного можно сформулировать следующие основные требования, предъявляемые к зерносушильной технике:

- высокое качество высушенного зерна при полном сохранении, в зависимости от назначения, семенных, пищевых и технологических достоинств;
- возможность сушки зерна без предварительной очистки;
- возможность одновременной сушки зерна различной влажности, что позволяет формировать партии зерна по природным и технологическим достоинствам;
- универсальность использования сушилки при сушке зерна различных культур;
- более высокие технико-экономические показатели в сравнении с лучшими действующими образцами;
- высокая надежность в работе, простота и безопасность в обслуживании;
- возможность автоматизации управления процессом;
- возможность обеспечения мягких режимов сушки для снижения трещинообразования.

1.2 Обзор конструкций гелиоустановок для сушки сельскохозяйственной продукции

Необходимость интенсификации сельскохозяйственного производства для полного удовлетворения потребности населения в продуктах питания требует не только дополнительных материально-энергетических затрат, но и мер по их масштабной экономии, а также пересмотра принципов ведения сельского хозяйства, конструирования и использования сельскохозяйственной техники в условиях рыночной экономики [15, 19, 73, 75, 78].

Интенсификация сельского хозяйства, ориентированная только на увеличение расхода энергоресурсов, потребовала бы огромных материальных затрат, рост которых не всегда соответствует приросту продукции. Это свидетельствует о необходимости экономии топливно-энергетических ресурсов, которая может быть достигнута за счет широкого применения интенсивных ресурсосберегающих технологий, применения возобновляемых и нетрадиционных источников энергии - солнца, ветра, биомассы, геотермальной теплоты. Эти источники энергии рассматриваются как существенное дополнение к традиционным. Среди возобновляемых источников энергии солнечная радиация по масштабам ре-

сурсов, экологической чистоте и повсеместности распространения наиболее интересна [15, 19, 74, 138].

Одним из недостатков высокотемпературных сушилок является неравномерность нагрева зерновой массы и образование трещин, вызываемое высокой скоростью сушки. Поэтому сушку элитных, суперэлитных и семян зерновых культур, направленных на продовольственные цели, целесообразно проводить в гелиосушилках, которые обеспечивают равномерность нагрева зерна и щадящий режим сушки, не вызывающий образование трещин. Использование гелиосушилок особенно рационально для условий опытных станций, семеноводческих и фермерских хозяйств, где необходимо сушить небольшие партии зерна и не допускать смешивания семян различных культур.

Технический потенциал ВИЭ в нашей стране составляет около 4,6 млрд. т условного топлива в год, а экономический потенциал определен в 270 млн. т условного топлива, что составляет около 25% от годового внутреннего потребления энергоресурсов в стране [15, 19, 136, 141, 143]. Экономический потенциал ВИЭ постоянно увеличивается в связи с непрерывным ростом затрат на добычу традиционного органического топлива и сопутствующими его применению проблемами загрязнения окружающей среды.

По данным [120] энергоресурсы солнца на территории страны составляют $24,4 \cdot 10^{15}$ кВт·ч/год, что в 12 тыс. раз превышает её энергопотребление. Годовая экономия энергии на 1 кВт установленной мощности при использовании солнечной энергии составляет от 0,07 до 0,09 т условного топлива, ветровой - 0,2. Плотность потока суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность при средней облачности составляет в день около 18,1 МДж/м². Интенсивность суммарной радиации, изменяется в летний период в течение дня в зависимости от облачности от 0,13 до 0,8 кВт/м². Так, например, в Москве вероятность прямой солнечной радиации в зимний период колеблется от 10 до 30% при суточной продолжительности 6-7 ч. В теплый период года вероятность инсоляции возрастает до 50% (продолжительность до 15 ч), что даёт реальную возможность использования солнечной энергии.

В южных районах России, в Восточной Сибири характерной особенностью климата является высокая интенсивность солнечной радиации. Например, в Чите инсоляция в марте достигает 77% при 8-часовой продолжительности и весьма низкой температуре воздуха [15].

Солнечная энергия вполне применима для низкотемпературной сушки зерна в пределах 50...60° северной широты европейской части страны, где ощущается нехватка естественной теплоты для этих целей (Брянская область расположена в пределах 52...54° северной широты) [120]. При этом наличие гравийного аккумулятора теплоты в гелиосушилке позволяет повысить эффективность сушки в периоды недостаточного поступления солнечной радиации.

Анализ солнечного радиационного режима показал, что в сезон уборки зерновых культур в Брянской области ежемесячно наблюдается не более 2...3 пасмурных дней, не менее 8...10 ясных дней и около 15...20 дней со средней облачностью, а число дней без солнца не превышает 1...2 в месяц. Усредненный за летний сезон суточный приход суммарной радиации на горизонтальную по-

верхность, представляющий собой энергетическую характеристику солнечного излучения, при средней облачности составляет в день $18,1 \text{ МДж/м}^2$ ($5 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^2$), а при ясной погоде - $27,7 \text{ МДж/м}^2$ ($7,7 \text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^2$). Интенсивность суммарной радиации, представляющая собой мощностную характеристику солнечного излучения, изменяется в летний период в течение ясного дня на горизонтальной поверхности от $0,25$ до $0,8 \text{ кВт/м}^2$, в течение дня со средней облачностью от $0,15$ до $0,55$, а в пасмурные дни от $0,13$ до $0,27 \text{ кВт/м}^2$ [19, 142].

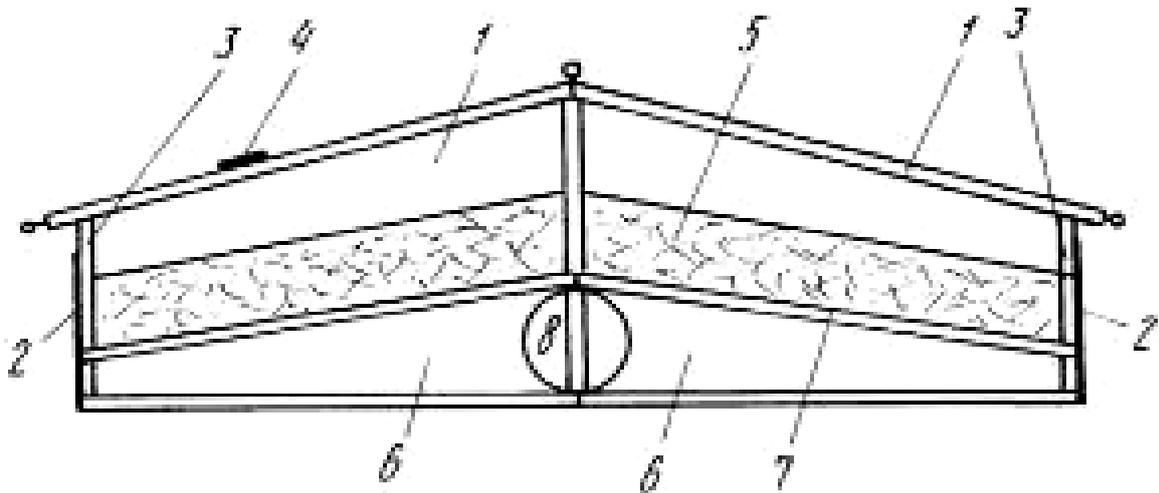
Использование простых гелиоколлекторов обеспечивает подогрев теплоносителя на $3\dots 5 \text{ }^\circ\text{C}$ даже при малой интенсивности солнечной радиации, а этого достаточно для снижения относительной влажности воздуха на $15\dots 25 \%$ [5, 19, 95, 134, 140]. В зависимости от назначения и материально-технических возможностей создаются различные типы солнечных коллекторов. Они, как правило, предназначены для конкретных гелиотехнических устройств и сильно различаются по технико-экономическим показателям.

Реализация способа сушки в гелиосушилках определяется объемом производства, погодными условиями местности, стоимостью дополнительного источника энергии. Передача теплоты к материалу от сушильного агента осуществляется путем излучения, конвективным путем или способом «горячий ящик». Таким образом, сушилки бывают радиационные, конвективные и кондуктивные. В радиационных происходит непосредственное облучение солнцем. Температура в сушилках этого типа достигает $60\dots 75 \text{ }^\circ\text{C}$. В конвективных продукт взаимодействует с воздухом, нагретым солнечной энергией. Конвективные гелиосушилки от радиационных отличаются также наличием разделенных солнечного воздухонагревателя и камерной или туннельной сушилки. В кондуктивных материал контактирует с нагретой поверхностью. Применяются также комбинированные сушилки, где присутствуют все три вида теплообмена с преобладанием конвекции [6, 8, 18, 23, 26, 34, 44, 45].

Естественная сушка сельскохозяйственных продуктов используется повсеместно и с давних пор, при этом продукты расстилают на земле, подвешивают под навесом или размещают на поддонах. При этом необходим тонкий зерновой слой и наличие конвекции воздуха над ним. При сушке на воздухе незащищенных сельхозпродуктов имеют место большие потери вследствие неполного высушивания, загрязнения, заплесневения, склёвывания птицами, повреждения насекомыми, действия осадков.

Рассмотрим сушилки радиационного типа. Различают солнечные сушилки с прямым и косвенным действием солнечной энергии. В установках первого типа солнечная энергия поглощается непосредственно самим продуктом и окрашенными в черный цвет внутренними стенками камеры, в которой находится высушиваемый материал.

Сушильная установка с прямым облучением влажного материала (рис. 1.1) содержит сушильную камеру, в боковых стенках которой выполнены воздушные щели.



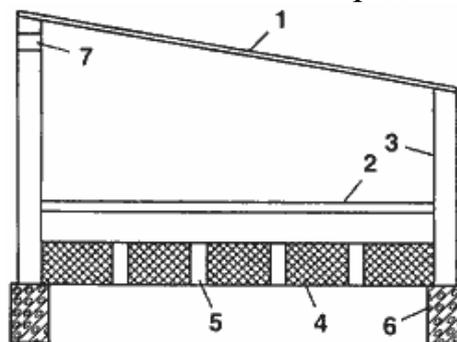
1 – сушильная камера; 2 – боковые стенки; 3 – воздушные щели; 4 – покрывающие средства; 5 – высушиваемый материал; 6 – трубопровод; 7 – перфорированная стенка; 8 – электродвигатель.

Рисунок 1.1 - Гелиосушилка с прямым облучением материала

Над высушиваемым материалом установлены покрывающие средства с образованием вентиляционного воздушного пространства. Под высушиваемым материалом установлен трубопровод, через который посредством вентилятора подается воздух. Покрывающие средства выполнены с возможностью сворачивания посредством роликовых трубок, снабженных приводом вращения. В солнечную погоду покрывающие средства сворачиваются, при возможном выпадении осадков они разворачиваются. Вентилятор может работать как в режиме нагнетания, так и в режиме всасывания, тем самым повышая вентиляцию в сушильной камере и отводя увлажненный воздух от высушиваемого материала. Для более быстрого высушивания материал периодически перемешивается механизмом ворошения [127].

В данном типе сушилки происходит прямой контакт солнечной радиации и высушиваемого материала, что повышает скорость сушки, но негативно отражается на качестве и свойствах этого материала.

Еще одна гелиосушилка такого же типа представлена на рис. 1.2.



1 - светопрозрачная изоляция; 2 - платформа для материала; 3 - стенка; 4 - теплоизоляция; 5, 7 - отверстия; 6 - фундамент.

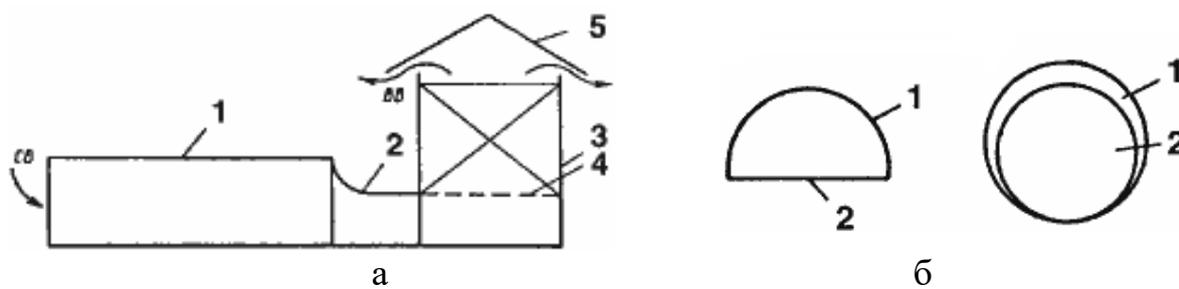
Рисунок 1.2 - Солнечная сушилка с облучением влажного материала

Она имеет верхнюю светопрозрачную изоляцию, перфорированную платформу для размещения высушиваемого материала, боковые стенки (южная стенка - гелиоколлектор), теплоизоляцию с отверстиями для поступления воздуха и основание. Для удаления влажного воздуха из гелиосушилки в верхней части северной стенки предусмотрены отверстия.

Сушильные установки второго типа содержат солнечный воздушнонагреватель и камерную или туннельную сушилку.

В камерной солнечной сушилке воздух движется через слой высушиваемого материала, размещенного на сетчатых поддонах, снизу вверх, в то время как в туннельной сушилке материал движется на конвейерной ленте в одну сторону, а воздух движется противотоком в обратном направлении.

Рассмотрим примеры конструктивного выполнения камерных гелиосушилок. Простая сушилка с использованием полимерной пленки может быть изготовлена в соответствии с рис. 1.3 [130].



а: 1 - пленочный воздушнонагреватель; 2 - воздуховод; 3 - сушильная камера; 4 - решетка; 5 - козырек; СВ и ВВ - свежий и влажный воздух;
б: 1- прозрачная полимерная пленка; 2 – черная полимерная пленка

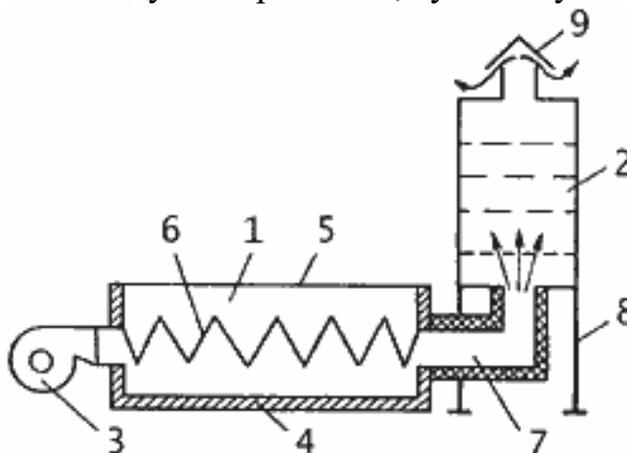
Рисунок 1.3 - Камерная солнечная сушилка (а) с пленочным воздушнонагревателем (б)

Сушилка работает на естественной тяге. Воздух нагревается в пленочном солнечном воздушнонагревателе и по воздуховоду поступает в нижнюю часть сушильной камеры, где на перфорированных поддонах (сетках, решетках) размещается влажный материал. Нагретый воздух движется в сушильной камере снизу вверх через слой материала и удаляется из камеры через зазор между верхней кромкой и козырьком. Стенки сушильной камеры могут быть теплоизолированы или выполнены из светопрозрачного материала.

Пленочный воздушнонагреватель изготавливается из полимерной пленки, натянутой на проволочный каркас. Верхняя поверхность нагревателя изготавливается из прозрачной пленки, а нижняя - из черной. Его можно также выполнить в виде двух цилиндрических поверхностей - наружной прозрачной и внутренней черной (рис. 1.3, б).

Недостатком данной сушилки является сушка продукта в неподвижном слое и невысокая тяга в сушильной камере, что снижает эффективность сушки.

Солнечная камерная сушилка с принудительным дутьем показана на рис. 1.4 [130]. Она включает: воздухонагреватель, сушильную камеру, вентилятор.

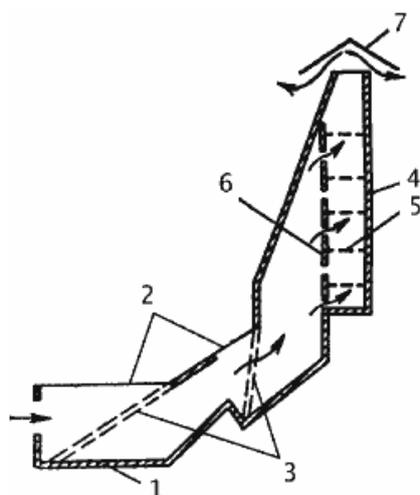


1 - воздухонагреватель; 2 - сушильная камера; 3 - вентилятор; 4 - теплоизолированный корпус; 5 - светопрозрачная изоляция; 6 - абсорбер; 7 - воздуховод; 8 - опора; 9 - козырек.

Рисунок 1.4 - Камерная солнечная сушилка с вентилятором и гофрированным абсорбером воздухонагревателя

В теплоизолированном корпусе воздухонагревателя со светопрозрачной изоляцией находится зачерненная лучепоглощающая поверхность из гофрированного металла. Горячий воздух по теплоизолированному воздуховоду поступает в сушильную камеру с перфорированными поддонами для высушиваемого материала, которая установлена на опорах и сверху накрыта козырьком.

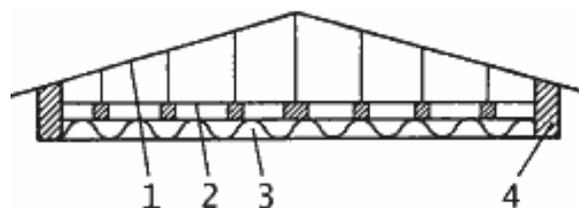
На рис. 1.5 показана еще одна конструкция гелиосушилки с естественным дутьем, отличающаяся типом воздухонагревателя [130]. В корпусе из оцинкованного железа с теплоизоляцией расположены две секции воздушного коллектора матричного типа. В корпусе предусмотрены отверстия для поступления наружного воздуха и светопрозрачная изоляция. Солнечная энергия поглощается в матрице, представляющей собой два ряда покрашенных черной краской металлических сеток со стальной стружкой между ними. Ее можно также сделать из нескольких слоев черной сетки. Нагретый воздух поступает в сушильную камеру, которая имеет суживающуюся кверху форму и ряд сеток, на которые укладывается влажный материал. Для подачи воздуха под каждый слой материала в камере предусмотрены вертикальные перегородки, образующие необходимые щели для воздуха. Сверху камера накрыта козырьком. Описанная гелиосушилка имеет высокую эффективность. КПД коллектора достигает 75% благодаря большому расходу воздуха ($0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ или $0,13 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$), а потери давления - до 250 Па. Срок окупаемости - до 5 лет.



1 - корпус воздухонагревателя; 2 - остекление; 3 - пористая лучепоглощающая насадка; 4 - сушильная камера; 5 - решетка для материала; 6 - перегородка; 7 - козырек

Рисунок 1.5 - Солнечная сушилка с пористым абсорбером воздухонагревателя

Простая и дешевая гелиосушилка может быть изготовлена из прозрачной и черной полимерной пленки, стабилизированной к действию ультрафиолетового излучения (рис. 1.6) [130].



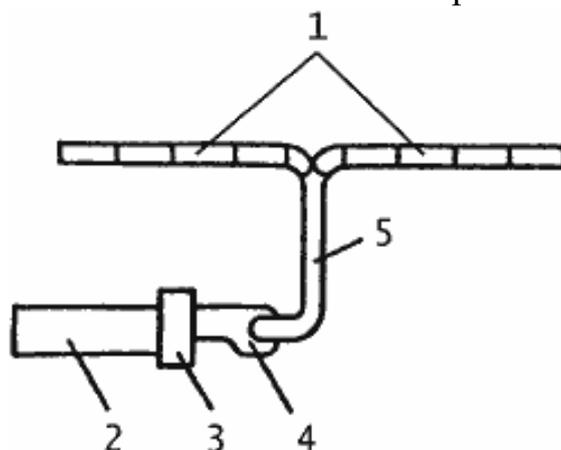
1 - прозрачная полимерная пленка; 2 - черная пленка на настиле для размещения продукта; 3 - теплоизоляция; 4 - боковые стенки.

Рисунок 1.6 - Пленочная солнечная сушилка

На деревянный каркас натянута полиэтиленовая пленка толщиной 0,1 м, а днище представляет собой черную полиэтиленовую пленку (0,1 мм), уложенную на слой шелухи толщиной 75 мм, служащей тепловой изоляцией. Боковые стенки внизу присыпаны землей, длина и ширина коллектора соответственно равны 30 и 4,6 м. Нагретый воздух поступает в цилиндрическую камеру диаметром 1,5 и высотой 1,8 м, в которой размещается 1,75 т сельскохозяйственного продукта (зерна) в несколько слоев толщиной по 150 мм.

Еще одна конструкция солнечной сушилки для различных сельхозпродуктов показана на рис. 1.7 [130]. Воздушный коллектор изготавливается из от-

дельных модулей площадью по 5 м^2 , которые в собранном виде образуют панели, устанавливаемые в наклонном положении на крыше сарая.



1 - модуль воздухонагревателя; 2 - сушильный желоб; 3 - вентилятор; 4 - воздухораспределитель; 5 - воздуховод.

Рисунок 1.7 - Солнечная сушилка с воздухонагревателем модульного типа

Внутри сарая размещаются: горизонтальный желоб или вертикальный бункер для влажного материала; вентилятор; воздухораспределительная камера.

Панели воздушного солнечного коллектора присоединяются к вентилятору с помощью воздуховода. Лучепоглощающая поверхность воздушного коллектора - пористая матрица, улавливающая солнечное излучение и имеющая чрезвычайно развитую поверхность контакта для нагрева воздуха. Боковые и задняя стенки корпуса из оцинкованного железа имеют тепловую изоляцию. Светопрозрачная изоляция - из специального прочного полимерного материала, устойчивого к ультрафиолетовому излучению, с высокой пропускной способностью для солнечного излучения.

Обычно модули шириной 4,2 и длиной 2,5 м соединяются последовательно. Две панели длиной по 14,5 м присоединены к одному вентилятору, прогоняющему воздух через этот солнечный коллектор. Так, для гелиосушки площадью поверхности солнечного коллектора 120 м^2 достаточно одного вентилятора мощностью 3,5 кВт, производительность сушилки 800 кг сырого или 400 кг высушенного продукта в день при среднедневной плотности потока солнечного излучения 19 МДж/м^2 в день. Зерно помещается в горизонтальном желобе, продуваемом нагретым воздухом. Аналогичные установки могут быть использованы для сушки кукурузы и других зерновых, листьев табака.

Для сушки зерна в вентилируемом горизонтальном желобе или вертикальном бункере может использоваться нагретый воздух, температура которого всего на $2...3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (при высоте слоя до 4 м) или на $5...15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (в слое высотой до 1,5 м) выше температуры окружающей среды. Ограничение высоты слоя обусловлено опасностью конденсации водяных паров в верхней части слоя, особенно в пасмурные дни с высокой влажностью воздуха.

Семенное зерно всех культур сушат также в складах на установках актив-

ного вентилирования атмосферным или подогретым воздухом. Наибольшую экономию энергии обеспечивают гелиосушилки с естественной тягой, т.е. без использования вентиляторов для принудительного продува сушильного агента через слой зерновой массы. Однако их эффективность ниже и регулирование расхода сушильного агента возможно лишь в небольших пределах. Повысить эффективность таких гелиосушилок можно за счет увеличения тяги в вытяжной трубе путем изготовления её в виде солнечного коллектора [103].

В такой сушилке, нижний коллектор подогревает атмосферный воздух, поступающий в сушильную камеру, а верхний коллектор вытяжной трубы подогревает отработанный сушильный агент, обеспечивая увеличение тяги и, соответственно, расхода воздуха в сушилке.

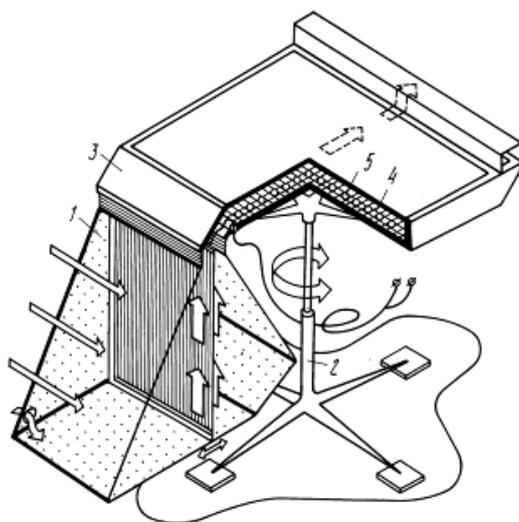
Конвективный способ сушки применяется как при плотном, так и при разрыхлённом или пересыпающемся состоянии зернового слоя.

Для сушки зерна в плотном неподвижном слое применяют различного типа напольные треугольные, ромбические сушилки [56]. Зерно насыпается на сетчатый пол и разравнивается. Сушильный агент подаётся под сетчатый пол и в межсеточное пространство. Процесс сушки длится 20...36 ч и более.

Недостатками этого способа является невозможность осуществления поточного процесса, наличие больших трудозатрат при погрузочно-разгрузочных работах, неравномерная сушка в различных точках объема зерновой насыпи в сушильной камере.

Имеются также гелиосушилки камерного типа с ориентацией на положение солнца (рис. 1.8). Платформа для сушки материала здесь также горизонтальна и неподвижна, однако отсутствует прямое воздействие солнечных лучей. Такая сушилка имеет большой КПД и, соответственно, скорость сушки [29].

Недостатком гелиосушки является невысокая естественная тяга в горизонтальной плоской сушильной камере и, соответственно, низкая скорость сушки.

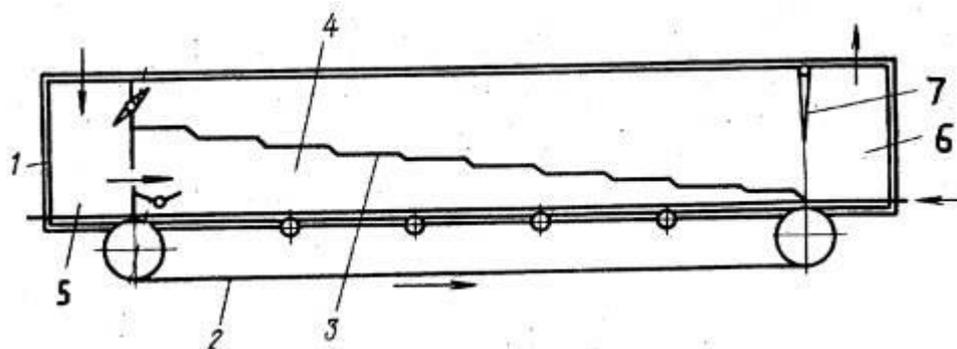


1 - воздухонагреватель; 2 - основание; 3 – сушильная камера; 4 – сетчатый поддон; 5 – высушиваемый материал

Рисунок 1.8 - Гелиосушилка, ориентированная на положение солнца

В конвективной сушке с плотным движущимся слоем контакт между отдельными зёрнами сохраняется, но непрерывно обновляется. Это изменяет активную поверхность, увеличивает скважистость слоя, равномерность прогрева, что способствует ускорению процесса сушки [24].

Сушка в плотном движущемся слое происходит в туннельных гелиосушилках. Принцип работы туннельных сушилок во многом отличается от камерных. Здесь высушиваемый материал находится в движении, обдуваясь противоточным сушильным агентом. Благодаря этому, скорость сушки значительно увеличивается. Однако, таким сушилкам необходим источник электроэнергии для привода ленточного конвейера. Принцип работы туннельной сушилки представлен на рисунке 1.9.

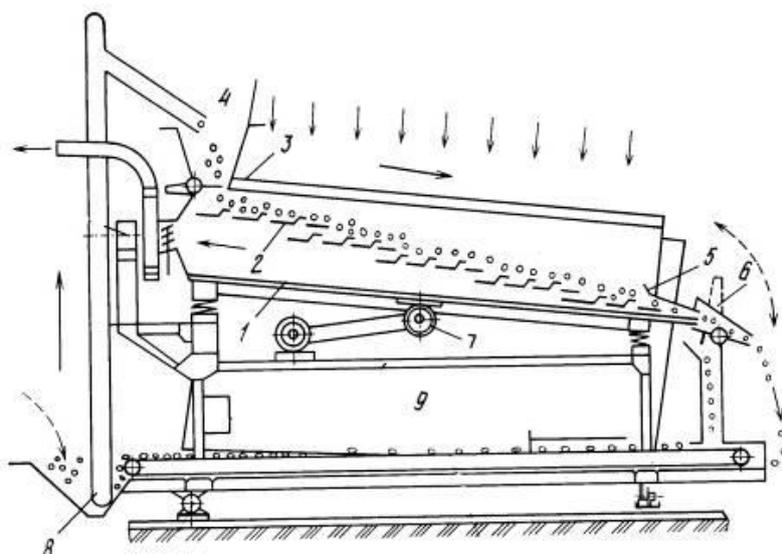


1 – сушильная камера; 2 - транспортер; 3 – профилирующая перегородка; 4 – канал движения сушильного агента; 5 – канал подвода сушильного агента; 6 – канал отвода увлажненного сушильного агента; 7 – заслонка

Рисунок 1.9 – Принцип работы туннельной сушилки

Сушилка состоит из сушильной камеры, внутри которой расположен транспортер с высушиваемым материалом. В сушильную камеру через входной канал из воздухонагревателя поступает сушильный агент. Он проходит между профилирующей перегородкой и транспортером, соприкасаясь с ломаной структурой перегородки, что вызывает возникновение воздушных вихрей. Вихревое движение сушильного агента обеспечивает более быструю сушку материала, двигающегося на транспорте во встречном направлении. Отработанный сушильный агент удаляется через выходной канал [126].

Рассмотрим более сложное устройство туннельной сушилки (рис. 1.10).



1 – наклонная камера; 2 – наклонные полки; 3 – светопрозрачное покрытие; 4 – загрузочный бункер; 5 – загрузочный патрубок; 6 – поворотная воронка; 7 – вибровозбудитель; 8 – элеватор; 9 - концентрирующие отражатели.

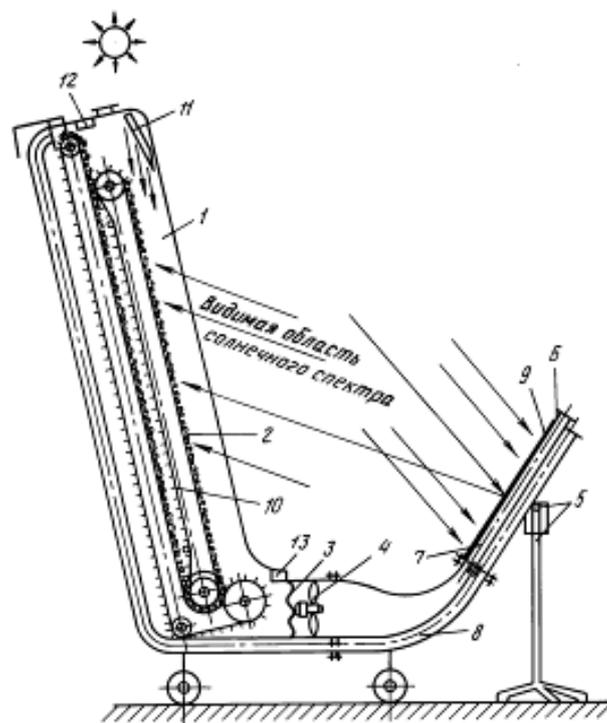
Рисунок 1.10 – Туннельная гелиосушилка с функцией непрерывного действия

Данная сушильная установка – смешанного типа. Сушка происходит конвективным и радиационным способами. Гелиосушилка состоит из поворотного каркаса вокруг шаровой опоры, на котором установлена наклонная камера на подпружиненных опорах. В наклонной камере расположены наклонные полки и прозрачный верхний сегмент. Высушиваемый материал в сушильную камеру поступает через загрузочный бункер.

Под сушильной камерой установлены концентрирующие отражатели, фокусирующие солнечное излучение на светопоглощающей стенке камеры. Под действием вибрации от вибровозбудителя и воздушных потоков от вентилятора зерно перемещается в виде виброкипящего слоя. Высушенный материал поступает через патрубок потребителю. При необходимости досушивания, материал через поворотную воронку, конвейер и элеватор вновь поступает в камеру для повторной сушки. Таким образом, сушилку можно использовать как для порционной, так и для непрерывной сушки [14].

Недостатком гелиосушилки является низкая величина гелиоподогрева сушильного агента вследствие незначительного времени его пребывания в сушильной камере под воздействием солнечной энергии, сложность конструкции сушилки, большой расход электроэнергии на привод ее механизмов, отсутствие аккумулятора теплоты.

Существуют также гелиосушилки смешанного типа - для сушки обрабатываемых продуктов радиационным и кондуктивным способами одновременно или раздельно (рис. 1.11).



1 – сушильная камера; 2 – высушиваемый материал; 3 – электрический источник энергии; 4 – вентилятор; 5 – опора; 6 – корпус; 7 – воздухозаборный канал; 8 – выводящий канал; 9 – высокоотражающее покрытие; 10 - транспортирующее устройство; 11 – источник ультрафиолетового излучения; 12 – датчик увлажнения; 13 – регулятор температуры.

Рисунок 1.11 – Гелиосушилка смешанного типа с возможностью контроля температуры и влажности

Гелиосушилка содержит сушильную камеру, с установленными внутри электрическим источником энергии, а на выходе – вентилятором. В ней также присутствует гелионагреватель воздуха, шарнирно установленный на опоре с возможностью слежения за солнцем в азимутальной и зенитальной плоскостях и оптически сопряженный с высушиваемым материалом. Рабочая поверхность гелионагревателя снабжена покрытием из материала с высокоотражающей в видимой области солнечного спектра и высокопропускающей в инфракрасной области способностью. Выводящие каналы одним концом сообщены с атмосферой, а другим соответственно с входом и выходом сушильной камеры. Сушильная камера снабжена транспортирующим устройством для высушиваемого материала и источником ультрафиолетового облучения.

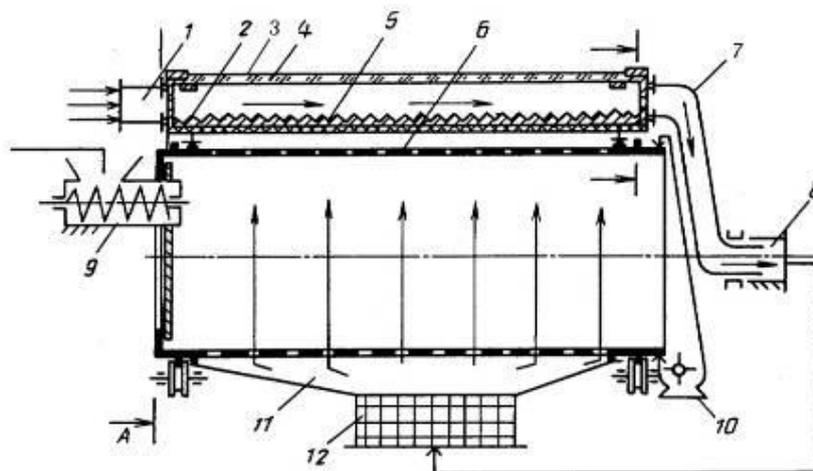
Гелиосушилка содержит также систему автоматического регулирования влажности и температуры воздуха в сушильной камере. Она состоит из датчика увлажнения и регулятора температуры с датчиком и задатчиком, электрически соединенному выходами с источником тепловой энергии и электродвигателем вентилятора. Данная система включается при недостаточной температуре в сушильной камере. Вначале осуществляется включение электрического источника. Подогретый таким образом воздух вентилятором нагнетается вверх и про-

сушит материал. При равенстве показаний температур на датчике температуры и задатчике регулятора, последний осуществляет отключение электрического источника энергии.

При наличии солнечного излучения, в результате попадания солнечного потока на рабочую поверхность гелионагревателя, ИК-часть солнечного спектра пропускается через светопрозрачную поверхность и обогревает воздух в воздухозаборном канале, засасываемом в сушильную камеру с помощью вентилятора, а отраженная от покрытия видимая часть солнечного спектра облучает при этом высушиваемый материал с помощью гелионагревателя [30].

Недостатком гелиосушилки является невозможность работы на естественной тяге при отсутствии электроэнергии, отсутствие аккумулятора теплоты и непригодность для сушки зерна.

Сушка в пересыпающемся слое применяется только в барабанных зерносушилках, где при вращении барабана зерно захватывают лопасти, с которых оно ссыпается вниз, и, пронизываемое сушильным агентом, пересыпается по полочкам. Рассмотрим пример барабанной гелиосушилки (рис. 1.12).



1 – патрубок подвода наружного воздуха; 2 – поглощающая поверхность; 3 – солнечный коллектор; 4 – прозрачное покрытие; 5 – теплоизолирующая прокладка; 6 – перфорированный барабан; 7 – патрубок отвода нагретого воздуха; 8 – исполнительный механизм; 9 – приспособление для загрузки продукта; 10 – приспособление для выгрузки продукта; 11 – диффузор; 12 – калорифер

Рисунок 1.12 – Барабанная гелиосушилка

Наружный воздух нагнетается вентилятором через патрубок в соответствующую секцию солнечного коллектора, нагретого солнечной радиацией. Воздух в секции коллектора нагревается, омывая гофрированную поверхность. Уровень нагрева воздуха контролируется вмонтированными в секции термодатчиками. После нагрева воздуха до нужной температуры термодатчиком подается импульс на исполнительный механизм, посредством которого воздухоотборник поворачивается и нагретый воздух из соответствующих секций, по

патрубку воздух подается через калорифер и диффузор в горизонтальную цилиндрическую камеру.

Подача нагретого воздуха в сушильную камеру происходит попарно последовательным включением максимально нагретых двух секций солнечного коллектора в воздушный тракт гелиосушилки посредством термодатчиков и воздухоотборника, который плотно прилегает к отверстиям.

Высушиваемый материал через загрузочное приспособление подается в полость перфорированного барабана, который при помощи привода приводится во вращение. Материал, перемешиваемый и равномерно омываемый горячим воздухом, перемещается вдоль оси барабана с места загрузки к месту выгрузки, высушивается и выгружается из барабана через выгрузочное приспособление. Гелиосушилка снабжена калорифером для догрева, в случае необходимости, воздуха до нужной температуры [31].

Недостатком гелиосушилки является сложность конструкции и отсутствие аккумулятора теплоты, который позволяет компенсировать временное и количественное несоответствие тепlopоступления от солнечной радиации и расхода теплоты [27, 63, 127, 128, 132].

В общем случае аккумулятор включает в себя резервуар, теплоаккумулирующий материал, устройства теплообмена для подвода при зарядке и отвода теплоты при разрядке аккумулятора, а также теплоизоляцию.

В зависимости от процессов, протекающих в теплоаккумулирующих материалах, аккумуляторы бывают следующих типов:

- емкостные (рис. 1.13), в которых агрегатное состояние аккумулирующего материала (камень природный, гравий, различные жидкости и др.) не изменяется;

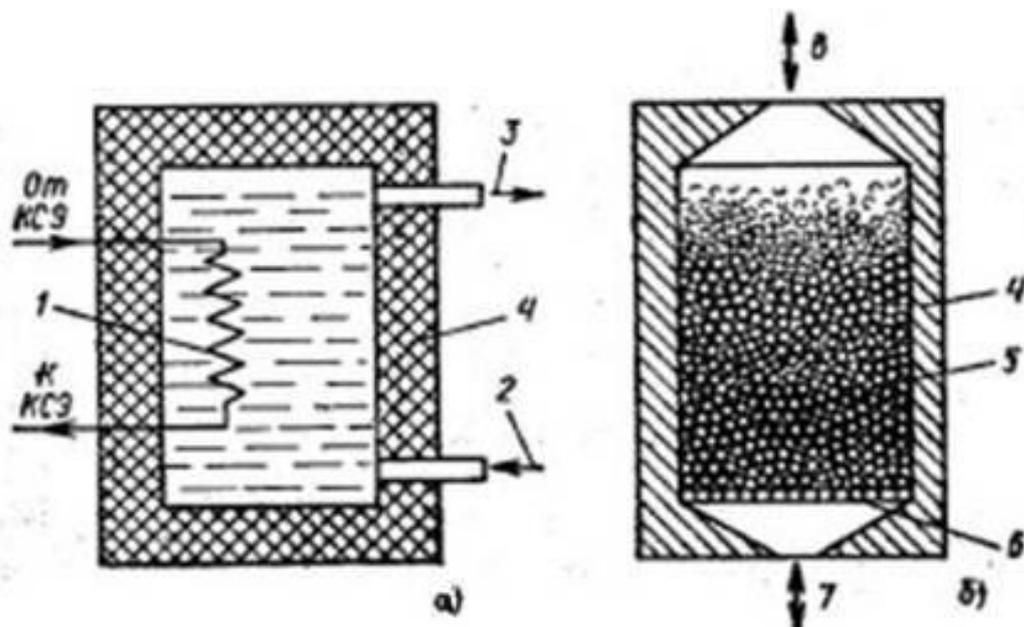
- использующие теплоту плавления вещества при его фазовом переходе;

- основанные на трансформации теплоты при обратимых химических и фотохимических реакциях.

В аккумуляторах наиболее распространенного первого типа происходит нагрев и охлаждение теплоаккумулирующего материала непосредственно солнечной энергией, либо через теплообменник. Данный способ не требует больших капитальных вложений и наиболее эффективен.

В основном это гравийные аккумуляторы теплоты, имеющие прямоугольное или круглое сечение и содержащие гальку или гравий размером от 20 до 50 мм (рис. 1.13, б).

Однако, имея одинаковую теплоемкость, гравийный аккумулятор по массе в 3 раза больше водяного аккумулятора. Поэтому применение водяного аккумулятора является наиболее эффективным.



1 – теплообменник; 2 – холодная вода; 3 – горячая вода; 4 – теплоизолированный резервуар; 5 – слой гальки; 6 – решетка; 7 – подвод сушильного агента; 8 – отвод сушильного агента

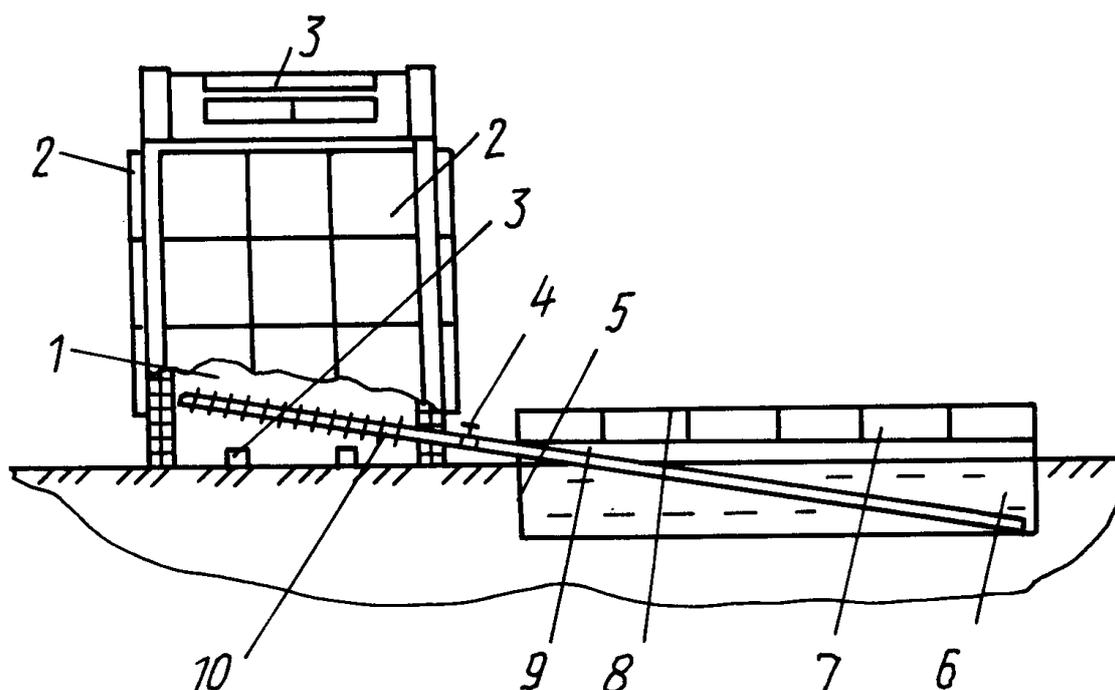
Рисунок 1.13 – Аккумуляторы емкостного типа: а) водяной; б) галечный

Рассмотрим гелиосушилки, содержащие емкостные аккумуляторы теплоты.

Известна гелиосушилка камерного типа, имеющая водяной аккумулятор теплоты. Такая сушилка более функциональна чем аналоги, т.к. может работать и при неблагоприятных погодных условиях за счет накопленной теплоты. Она более сложна в конструкции, но и более производительна (рис. 1.14).

В конструкцию данной гелиосушилки входит камера с системой вентиляции, тепловой аккумулятор, магистраль передачи тепловой энергии от теплового аккумулятора к сушильной камере в виде тепловых труб. Сушильная камера оснащена также установленными на ее стенках и крыше солнечными светопрозрачными и светопоглощающими панелями. Она также имеет в нижней части стен и в верхней части крыши люки для естественной вентиляции.

Солнечный нагреватель, установленный над тепловым аккумулятором, собран из светопрозрачных солнечных панелей, состоящих из двух экранов, второй из которых имеет селективное покрытие с малой степенью черноты, тепловой аккумулятор заполнен теплоаккумулирующей жидкостью. От теплоаккумулирующей жидкости тепловой поток отбирается регулируемыми тепловыми трубами и передается воздуху сушильной камеры, а от него - высушиваемому материалу. Тепловые трубы в зоне их расположения в сушильной камере имеют ребристую структуру. В данной установке максимально используются поверхности для приема солнечной энергии, и совсем не потребляется электроэнергия.



1 – сушильная камера; 2 – светопрозрачные и светопоглощающие солнечные панели; 3 – вентиляционные люки; 4 – органы управления гравитационными трубами; 5 – тепловой аккумулятор; 6 – теплоаккумулирующая жидкость; 7 – светопрозрачные солнечные панели; 8 – светопрозрачный экран; 9 – светопрозрачный экран с селективным покрытием; 10 – гравитационные регулируемые трубы.

Рисунок 1.14 – Камерная гелиосушилка с тепловым аккумулятором

Данная гелиосушилка имеет высокую производительность при сушке в ночное время и при сушке в неясную погоду. Однако, у нее значительные габариты из-за наличия большого водяного аккумулятора теплоты [123].

Для сушки зерна эта гелиосушилка малоприспособна из-за сушки в неподвижном слое.

1.3 Способы интенсификации тепломассообмена в процессе сушки зерна

Процесс сушки состоит из внутреннего тепловлагодпереноса и внешнего тепловлагодпереноса с поверхности материала в окружающую среду. Агент сушки непрерывно контактирует с поверхностью материала, обтекая его. Это приводит к образованию вблизи поверхности материала пограничного слоя. Когда поток сушильного агента обтекает тело, его частицы соприкасаются с поверхностью этого тела и тормозятся вследствие трения. Скорость сушильного агента вдоль поверхности тела растет по перпендикуляру к ней до значения скорости набегающего потока.

При обтекании тела пограничным слоем у его поверхности считают тонкую в поперечном сечении область течения, имеющую резкие изменения значения температуры, скорости или концентрации вещества. Толщина этих слоев

различна. Она определяется состоянием поверхности материала, скоростью движения и вязкостью сушильного агента.

Если процессы внутреннего тепловлагопереноса не ограничивают, то наибольшее сопротивление перемещению влаги и теплоты оказывает пограничный слой. Выделяющийся из высушиваемого материала пар вызывает возникновение в пограничном слое градиента концентрации пара, который направлен противоположно градиентам температуры и скорости.

Концентрация пара и, соответственно парциальное давление, падает с удалением от поверхности материала. Это вызывает диффузию пара от материала в окружающую среду. Атмосферный воздух, поступая к поверхности материала, вытесняет пар, образуя при постоянном давлении конвективный перенос смеси и пара [88, 130].

Для повышения скорости сушки необходимо внедрять прогрессивные технологии, которые бы позволили интенсифицировать тепломассоперенос. Такие технологии основываются как на внешнем, так и на внутреннем теплообмене.

Интенсификация внешнего тепломассообмена может обуславливаться следующими причинами [2]:

- ростом разности концентраций и температур пара в сушильном агенте и в пограничном слое;
- увеличением межфазной поверхности при измельчении высушиваемого материала, его интенсивном перемешивании;
- относительным увеличением скоростей движения материала и сушильного агента из-за перемены направления их движения, придания потоку турбулентности;
- изменением свойств агента сушки, например, использование перегретого пара, инертных газов, вакуумирование, повышение давления и т.п.;
- воздействием иных тепловых потоков - инфракрасного излучения, электромагнитного поля;
- взаимодействием фаз при нестационарных условиях, например, при использовании пульсирующих тепловых потоков;
- применением комбинированных способов подвода теплоты, например, сочетанием инфракрасного и конвективного или высокочастотного подвода, кондуктивно-конвективного и т.д.;
- применением активного вентилирования зерновой массы с целью интенсивного удаления влаги с поверхности зерна.

Интенсификация внутреннего тепломассообмена может быть достигнута путем:

- использования сушильного агента с максимально допустимой температурой нагрева;
- управления распределением в объеме материала влагосодержания, температуры, давления для увеличения движущей силы использованием, например, пульсирующих режимов подвода энергии, вакуумирования и т.д.;
- воздействия высокоэнергетических полей интенсивного подвода тепло-

ты, например СВЧ, инфракрасного излучения, различных комбинированных способов;

- добавления к материалу различных поверхностно-активных добавок, способствующих внутреннему влагопереносу;

- снижения внутреннего сопротивления диффузии влаги за счет изменения структуры материала до или в процессе сушки.

Метод увеличения активной межфазной поверхности в результате интенсивного перемешивания осуществляется при сушке зерновой массы в пересыпающемся слое и применяется только в барабанных зерносушилках.

Обычно в сушильных барабанах направление движения материала и теплоносителя совпадает. Это позволяет использовать сушильный агент с высокой температурой нагрева, вначале влажный материал контактирует с горячими газами и его перегрева не происходит.

Барабанные сушильные установки широко применяются как при больших, так и малых объемах сушки.

При больших объемах сушки используют барабанные сушилки с диаметром барабана до 5 м и длиной до 40 м.

Удельный расход теплоты таких установок - 5800 кДж на 1 кг испаренной влаги при затрате около 40 кВт·ч электроэнергии. Однако сушилки данного типа имеют высокую производительность 8...10 т/ч. Барабан обычно располагается под наклоном к выводу высушенного материала, что позволяет самопроизвольно производить выгрузку. Однако имеются и минусы: воздействие высоких температур и отсутствие возможности досушивания материала [2].

На элеваторах, хлебоприемных предприятиях и при сушке зерна широкое применение получил способ активного вентилирования. Сущность этого способа заключается в интенсивном продувании зерновой насыпи атмосферным воздухом. Основное назначение активного вентилирования – охладить и подсушить зерновую насыпь без ее перемешивания для предотвращения и устранения самосогревания, развития плесеней и вредителей хлебных запасов. В отдельных случаях активное вентилирование применяют для ускорения процесса послеуборочного дозревания, выравнивания температуры и влажности зерновой массы.

Охлаждение зерна, заложенного на длительное хранение, позволяет предотвратить ухудшение качества и его порчу. Кроме того, установки для активного вентилирования можно использовать в зерносушилках.

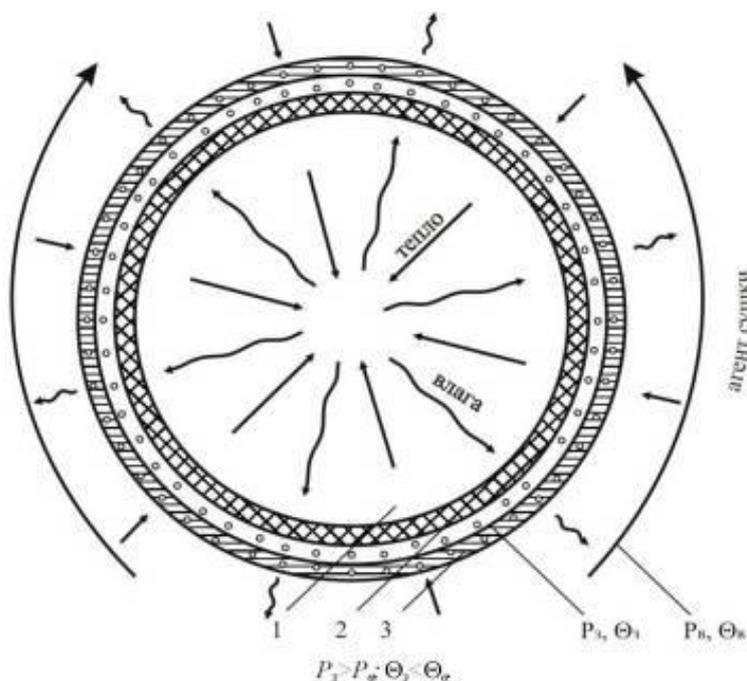
При сушке в зерносушилках активное вентилирование используется с целью отвода образовавшейся на поверхности зерна избыточной влаги, тем самым интенсифицируя процесс сушки.

Механизм удаления влаги из зерна при активной вентиляции в зерносушилках протекает следующим образом (рис. 1.15). Агент сушки с параметрами $\theta_в$ – температура и $P_в$ - парциальное давление движется вдоль поверхности влажного зерна. Благодаря конвекции теплота агента сушки передается зерну, нагревает его поверхность до температуры $\theta_з$, что приводит к испарению поверхностной влаги. В объеме зерна возникают градиенты влагосодержания и

температуры, вызывающие диффузионный процесс переноса влаги к поверхности зерна в зону испарения.

Агент сушки поглощает оторвавшиеся от поверхности зерна и диффундирующие через пограничный слой молекулы пара. В этот период необходимо увеличить расход сушильного агента. Непременное условие процесса испарения влаги с поверхности зерна - разность парциальных давлений у его поверхности P_z и в агенте сушки $P_в$.

Этот способ интенсификации сушки не требует больших экономических затрат и идеально подходит для небольших сушильных установок.



1 – зерно; 2 – слой пограничный; 3 – зона испарения влаги

Рисунок 1.15 – Испарение влаги из зерна при сушке с использованием активного вентилирования

Из всех перечисленных методов и режимов интенсификации процесса сушки для барабанной гелиосушилки целесообразно применение двух методов - повышение температуры сушильного агента и активное вентилирование зерновой массы с целью интенсивного удаления влаги с поверхности зерна. Данные методы хорошо комбинируются и не требуют больших энергетических и экономических затрат. При этом следует отметить, что интенсивный нагрев рекомендуется использовать на начальном этапе сушки при прогреве высушиваемого материала, а активное вентилирование на конечном этапе при интенсивном удалении образовавшейся на поверхности высушиваемого материала влаги.

Глава 2 Обоснование конструктивно-технологических параметров барабанной гелиосушилки зерна

2.1 Обоснование принципиальной схемы барабанной гелиосушилки

Правильно организованная сушка позволяет ускорить этот процесс, а также способствует выравниванию влажности и степени зрелости зерновой массы, улучшению внешнего вида и технологических свойств зерна [96, 105, 129, 136, 137].

В общем виде можно так сформулировать требования, которым должен соответствовать режим сушки: сушка должна протекать с минимальными затратами энергии, с максимальной скоростью удаления влаги при сохранении технологических свойств высушенного зерна.

В известных конструкциях солнечных коллекторов высушиваемый материал подвергается прямому воздействию солнечных лучей, что приводит к ухудшению его качества, также не обеспечивается равномерное распределение нагретого воздуха по высушиваемому материалу, что снижает эффективность сушки [73].

Известна гелиосушилка (рис. 2.1), содержащая последовательно установленные солнечный коллектор, сушильную камеру с решетчатым дном и вытяжную трубу с дефлектором на выходном конце высотой не менее половины высоты сушильной камеры, выполненную одной частью из светопрозрачного материала, другой - из светопоглощающего [10].

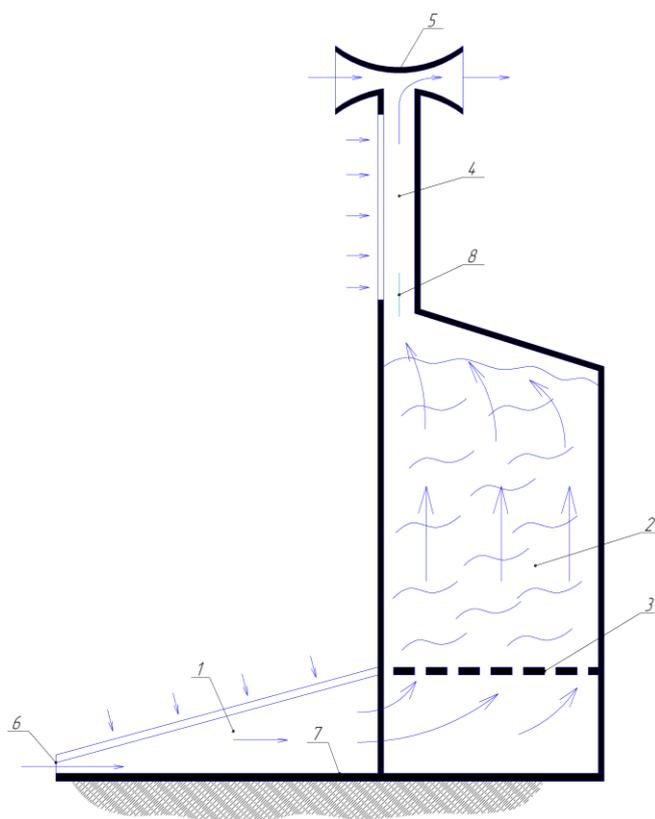


Рисунок 2.1 - Гелиосушилка периодического действия

Недостатком такой гелиосушилки является то, что высушиваемый материал находится в виде неподвижного уплотненного слоя, что снижает интенсивность тепло-массообменных процессов.

В гелиосушилках кондуктивно-конвективного действия [11] (рис. 2.2) высушиваемый материал находится в состоянии непрерывного движения по тепло-воспринимающей поверхности. Скорость движения регулируется величиной открытия выгрузной заслонки в нижней части солнечного коллектора. Недостатком является прямое воздействие солнечных лучей на высушиваемый материал и опасность его нагрева до температуры, превышающей допустимые пределы.

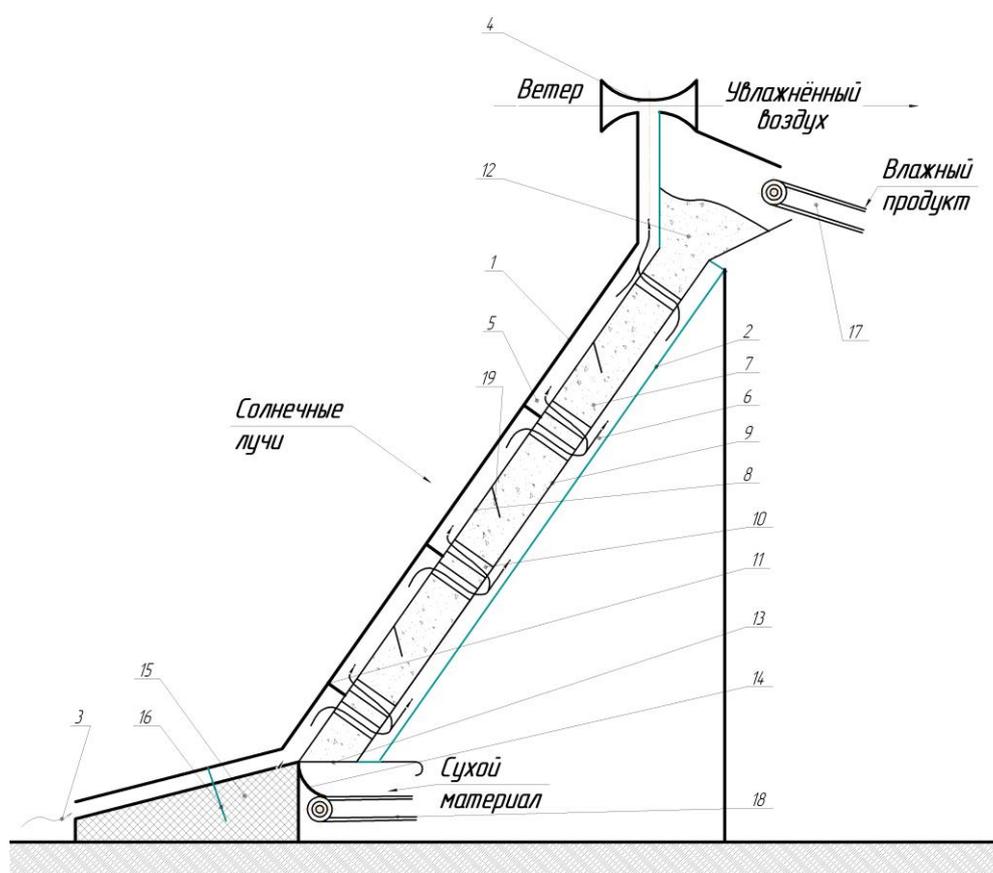


Рисунок 2.2 - Гелиосушилка непрерывного действия

В гелиосушилке [96] на рис. 2.3 высушиваемый материал необходимо распределять тонким слоем на поддонах, что приводит к снижению массы загружаемого материала и, соответственно, не высокой производительности сушилки.

Недостатком гелиосушилки [9] (рис. 2.4) является сложность конструкции, неподвижность высушиваемого материала в процессе сушки, а также рециркуляция отработанного сушильного агента.

Аналогичными недостатками обладают напольные сушилки, требующие, кроме того, большого расхода электроэнергии.

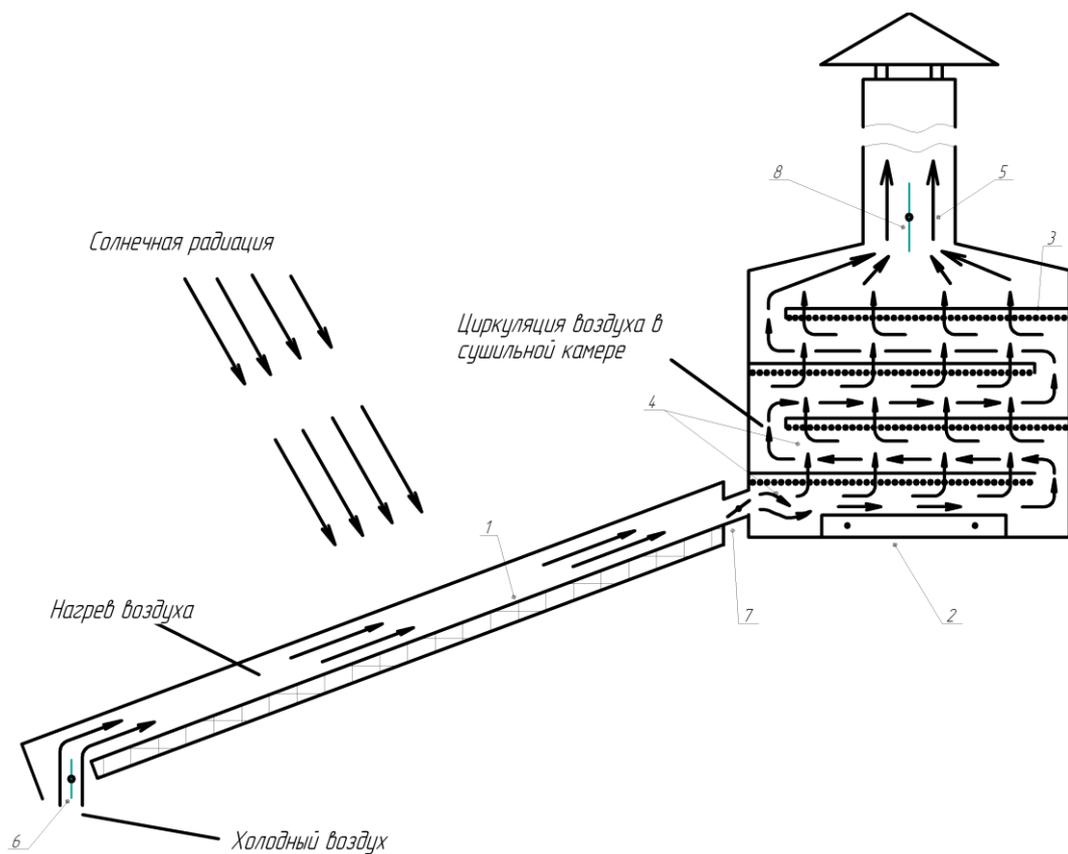


Рисунок 2.3 - Солнечная сушилка КГСА-2

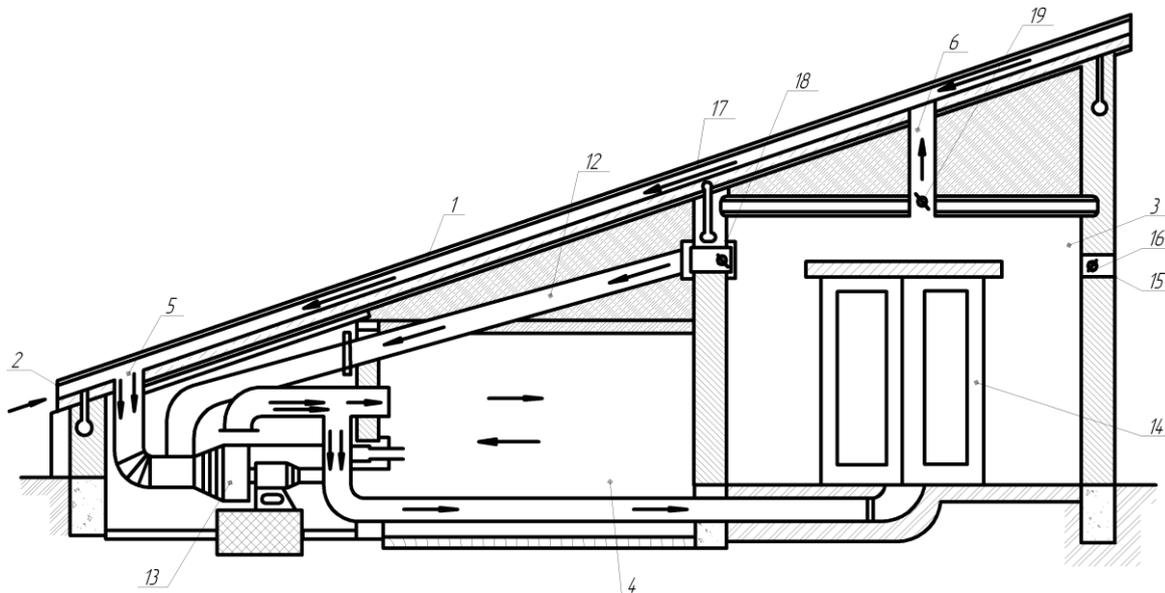
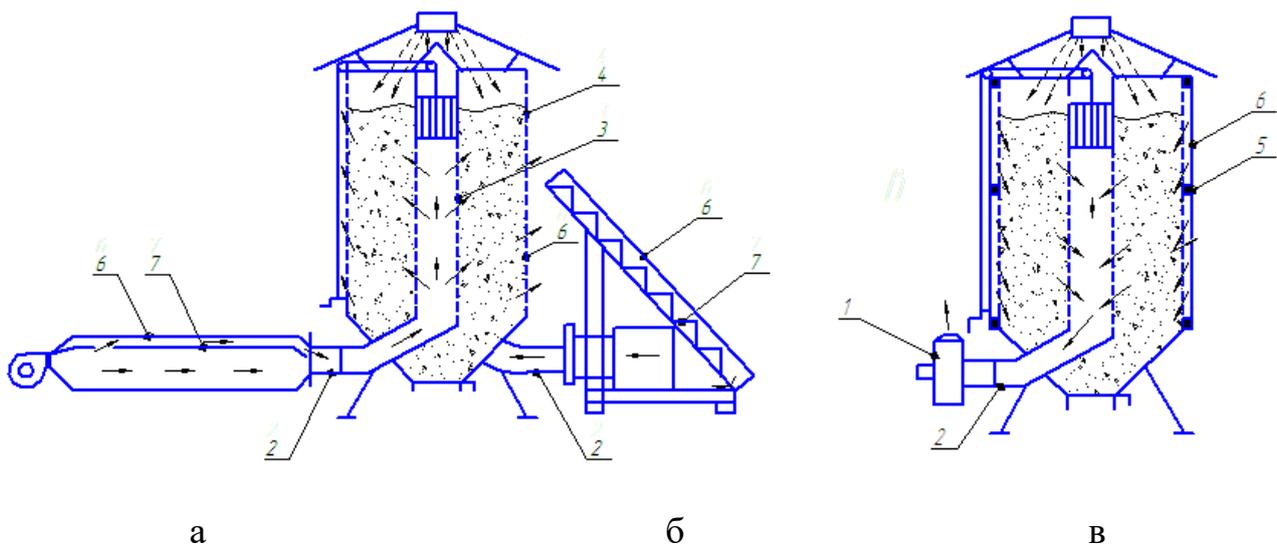


Рисунок 2.4 - Гелиосушилка периодического действия

Недостатком гелиосушки [95] рис. 2.5 является сложность конструкции и неподвижность высушиваемого материала в процессе сушки.



а - с надувным трубчатым пленчатым коллектором; б - с плоским солнечным коллектором; в - с коллектором оболочкой

Рисунок 2.5 - Схема гелионагрева теплоносителя в бункерах активного вентилирования

Таким образом, гелиосушилка зерна должна быть периодического действия, состоять из наклонного солнечного коллектора с гравийным аккумулятором, сушильной камеры, в которой размещен перфорированный барабан с приводом, и вытяжной трубы, выполненной в виде солнечного коллектора с дефлектором [76, 77].

2.2 Определение требуемой площади гелиоколлекторов

Основой для расчета площади гелиоколлекторов и емкости аккумулятора является требуемое количество удаляемой влаги, т.е. производительность гелиосушилки, и необходимый расход агента сушки.

Для расчёта затрат теплоты в гелиосушилке на основе баланса сухого вещества зерна определим массу удаляемой влаги [48]

$$m_v = m_{з.н.} \frac{\omega_{з.н.} - \omega_{з.к.}}{100 - \omega_{з.к.}}, \quad (2.1)$$

где $m_{з.н.}$ - масса влажного зерна до сушки, кг;

$\omega_{з.н.}$ - влажность зерна до сушки, %;

$\omega_{з.к.}$ - влажность зерна после сушки, %.

Баланс влаги позволяет определить расход агента сушки:

$$d_{1cp} = d_o + m_g \cdot \left(\frac{1000}{\tau_{суш.}} \cdot \frac{L}{L} \right), \quad (2.2)$$

где d_{1cp} - среднее влагосодержание отработанного агента сушки, г/кг;

d_o - начальное влагосодержание агента сушки, г/кг;

L - расход агента сушки, кг/с;

$\tau_{суш.}$ - продолжительность сушки зерна, с.

С учетом выражений (2.1) и (2.2) время сушки зерна

$$\tau_{суш.} = \frac{10^3 m_{з.н.}}{L \cdot (d_{1cp} - d_o)} \cdot \frac{\omega_{з.н.} - \omega_{з.к.}}{100 - \omega_{з.н.}}. \quad (2.3)$$

Средний удельный расход сухого агента сушки будет равен

$$l_{cp} = \frac{L \cdot \tau_{суш.}}{m_g} = \frac{1000}{d_{1cp} - d_o}, \quad \text{кг/кг}. \quad (2.4)$$

На рис. 2.6 представлена функционально-параметрическая схема барабанной гелиосушилки.

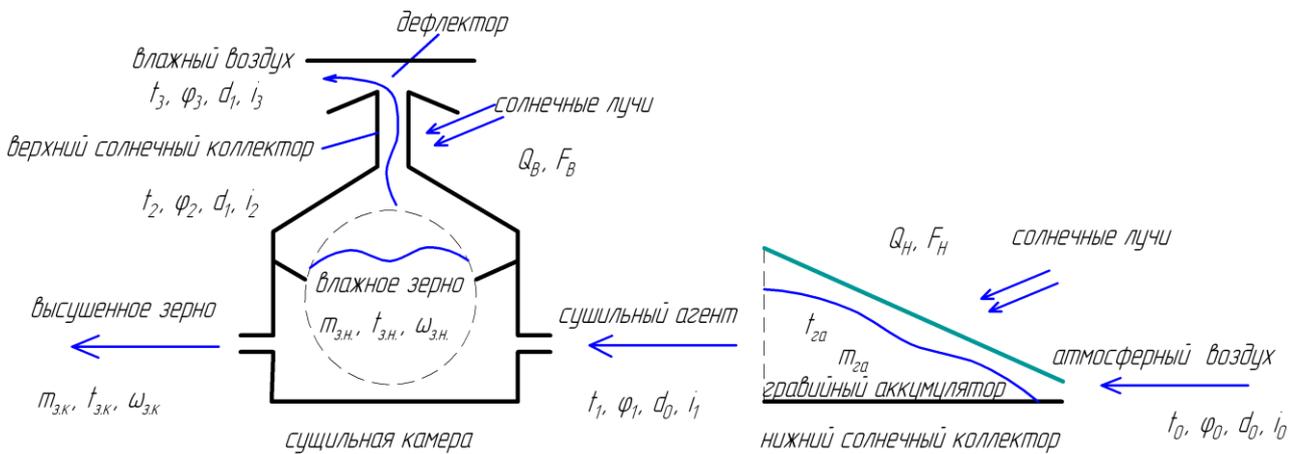


Рисунок 2.6 - Функционально-параметрическая схема барабанной гелиосушилки

Тепловой баланс барабанной гелиосушилки за один цикл сушки в дневное время можно представить в виде:

$$L \cdot i_o + \sum Q_{Hcp} = Q_{CA} + Q_{GA} + Q_3 + Q_B + Q_{OC}, \quad \text{Вт}, \quad (2.5)$$

где i_o - энтальпия атмосферного воздуха, Дж/кг;

$Q_{Нср}$ - средняя плотность потока солнечной энергии, Вт/м²;
 F_H - площадь нижнего солнечного коллектора, м²;
 Q_{CA} - затраты теплоты, связанные с изменением энтальпии сушильного агента, Вт;
 $Q_{ГА}$ - затраты теплоты на нагрев аккумулятора, Вт;
 Q_3 - потери теплоты на нагрев зерна, Вт;
 Q_B - потери теплоты на нагрев сушильного барабана, Вт;
 Q_{OC} - потери теплоты в окружающую среду, через ограждения сушилки, Вт.

Затраты теплоты Q_{CA} учитывают теплоту, затраченную на испарение влаги из зерна и возвращенную в виде энтальпии водяного пара, и определяются по формуле:

$$Q_{CA} = L \cdot i_2, \text{ Вт}, \quad (2.6)$$

где i_2 - энтальпия сушильного агента на выходе из сушильного барабана, Дж/кг.

Затраты теплоты на нагрев аккумулятора

$$Q_{ГА} = \frac{m_{га} \cdot c_{га} (t_{га} - t'_{га})}{\tau_{зар.}}, \text{ Вт}, \quad (2.7)$$

где $m_{га}$ - масса гравийного аккумулятора, кг;
 $c_{га}$ - теплоемкость гравия, Дж/(кг °С);
 $t_{га}$ - температура аккумулятора в конце зарядке, °С;
 $t'_{га}$ - температура аккумулятора в начале сушки, °С;
 $\tau_{зар.}$ - время зарядки гравийного аккумулятора, с.

Потери теплоты на нагрев сушильного барабана с приводом

$$Q_B = \frac{m_{б} \cdot c_{б} (t_{б} - t'_{б})}{\tau_{нагр.}}, \text{ Вт}, \quad (2.8)$$

где $m_{б}$ - масса барабана с приводом, кг;
 $c_{б}$ - теплоемкость барабана, Дж/(кг °С);
 $t_{б}$ - температура барабана в конце сушки, °С, (можно принять равной конечной температуре зерна);
 $t'_{б}$ - температура барабана в начале сушки, °С, (можно принять равной начальной температуре зерна).

Потери теплоты на нагрев зерна

$$Q_3 = \frac{m_{з.н.} \cdot c_3 \cdot 10^{-3} (t_{зк} - t_{зн})}{\tau_{нагр.}}, \text{ Вт}, \quad (2.9)$$

где c_3 - теплоемкость зерна, кДж/(кг·°С);

$t_{зк}$ - температура зерна в конце сушки, °С;

$t_{зн}$ - температура зерна в начале сушки, °С;

$\tau_{нагр.}$ - продолжительность периода нагрева зерна (сушильного барабана), с.

Теплоемкость зерна зависит от его влажности и определяется по формуле [48]

$$c_3 = \frac{[4,19 \cdot \omega_3 + 1,55 \cdot (100 - \omega_3)]}{100}, \quad (2.10)$$

где ω_3 - текущая влажность зерна, %.

Потери теплоты в окружающую среду через ограждения

$$Q_{OC} = \sum F_i K \cdot (t_{СКсп} - t_{OCсп}), \text{ Вт}, \quad (2.11)$$

где $\sum F_i$ - суммарная поверхность теплоотдающих ограждений гелиосушилки, м²;

K - коэффициент теплопередачи от агента сушки в окружающую среду через ограждения гелиосушилки, Вт/(м²·°С);

$t_{СКсп}$ - средняя температура в сушильной камере за период сушки, °С;

$t_{OCсп}$ - средняя температура окружающей среды за период сушки, °С.

Из выражения (2.4) с учетом (2.5) получим значение требуемой площади нижнего солнечного коллектора

$$F_H = \frac{1}{\sum Q_{Нсп}} \cdot [L \cdot (i_2 - i_0) + Q_{ГА} + Q_3 + Q_B + Q_{OC}], \text{ м}^2 \quad (2.12)$$

С учетом формул (2.6), (2.7), (2.8), (2.9) и (2.11) получим выражение требуемой площади нижнего солнечного коллектора в развернутом виде:

$$F_H = \frac{1}{Q_{Нсп}} \left[L(i_2 - i_0) + \frac{m_{за} c_{за} (t_{за} - t'_{за})}{\tau_{зап.}} + \frac{m_{з.н.} c_3 (t_{зк.} - t_{зн.})}{\tau_{нагр.}} + \frac{m_0 c_0 (t_0 - t'_0)}{\tau_{нагр.}} + \sum F_i K (t_{СКсп} - t_{OCсп}) \right]. \quad (2.13)$$

В случае повышения температуры зерна до конца процесса сушки, т.е. при $\tau_{нагр.} = \tau_{суш.}$ из выражения (2.13) получим время сушки зерна в дневное время в зависимости от конструктивно-технологических параметров гелиосушки и физических параметров окружающей среды

$$\tau_{суш.} = \frac{m_{з.н.} c_{з.н.} (t_{з.к.} - t_{з.н.}) + m_{\delta} c_{\delta} (t_{\delta} - t'_{\delta})}{F_H Q_{Нсп} L(i_2 - i_1) - \sum F_i K (t_{СКсп} - t_{ОСсп}) - m_{за} c_{за} (t_{за} - t'_{за}) / \tau_{зар.}}. \quad (2.14)$$

Тепловой коэффициент полезного действия барабанной гелиосушки в дневное время за один цикл сушки

$$\eta_{\delta} = \frac{1}{L \cdot i_o + \sum Q_{Нсп} F_H} \cdot \left(\frac{m_{\delta} \cdot r}{\tau_{суш.}} + Q_3 + Q_{ГА} \right), \quad (2.15)$$

где r - теплота парообразования, Дж/кг.

Тепловой баланс барабанной гелиосушки за один цикл сушки в ночное время за счет энергии, накопленной аккумулятором, имеет вид:

$$L \cdot i_o + Q_{ГА} + Q_B + Q_3 = Q_{СА} + Q_{ОС}, \text{ Вт.} \quad (2.16)$$

Здесь $Q_{ГА}$, Q_B и Q_3 определяются аналогично формулам (2.7), (2.8) и (2.9) только с учетом не нагрева, а охлаждения в соответствующем интервале температур.

Тогда тепловой КПД барабанной гелиосушки в ночное время

$$\eta_n = \frac{m_{\delta} \cdot r}{(L \cdot i_o + Q_{ГА}) \cdot \tau_{суш.}}. \quad (2.17)$$

Верхний солнечный коллектор обеспечивает усиление тяги в вытяжной трубе, т.е. расхода сушильного агента за счет его подогрева.

Ширина вытяжной трубы и, соответственно, верхнего солнечного коллектора может быть принята равной ширине гелиосушки (нижнего солнечного коллектора). Однако при ширине гелиосушки более двух метров необходимо уменьшать парусность вытяжной трубы путем её разделение на несколько частей.

Высота вытяжной трубы будет определять скорость движения воздуха в ней по формуле:

$$v_m = 2,2 \sqrt{\frac{H_T \cdot (t_3 - t_o)}{273}}, \text{ м/с,} \quad (2.18)$$

где H_T - высота вытяжной трубы, м;
 t_3 - температура воздуха на выходе из вытяжной трубы, $^{\circ}\text{C}$.

Самотяга вытяжной трубы

$$\Delta P_{mp} = H_T \left(1,2 - \rho_0 \frac{273}{273 + t_3} \right) g, \quad (2.19)$$

где 1,2 - плотность воздуха при 20°C , $\text{кг}/\text{м}^3$;
 ρ_0 - плотность удаляемого воздуха при 0°C , $\text{кг}/\text{м}^3$;
 g - ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

В процессе сушки в дневное время разница $(t_3 - t_0)$ имеет тенденцию к увеличению. Скорость v_m в начале сушки должна обеспечивать интенсивный отвод испаряемой поверхностной влаги от зерновой массы. К концу сушки интенсивность испарения влаги падает, и скорость движения воздуха в меньшей степени влияет на процесс. Все это усложняет определение требуемой высоты вытяжной трубы.

На основании выражения (2.18) построим зависимость высоты вытяжной трубы H_T от разности $(t_3 - t_0)$ при различной скорости движения воздуха в трубе (рис. 2.7).

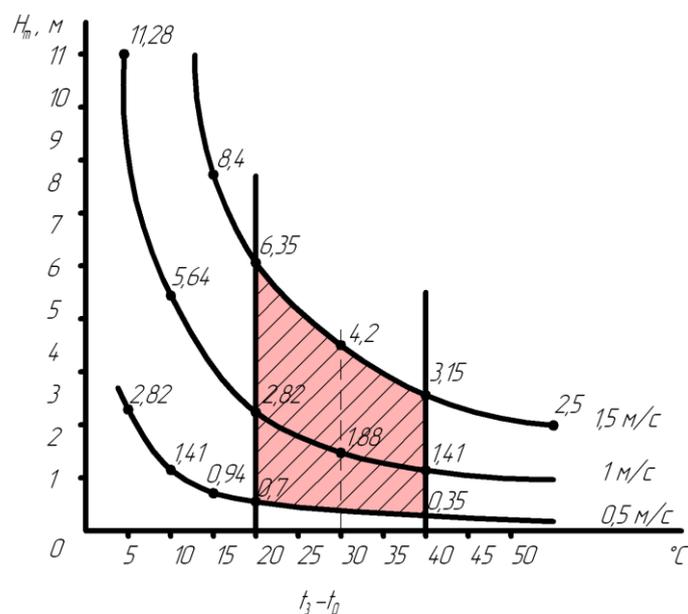


Рисунок 2.7 - Зависимость высоты вытяжной трубы от разности температур сушильного агента и окружающего воздуха

В период сушки для условий Брянской области диапазон дневных температур атмосферного воздуха составляет от 15 до 35°C . По данным [115] макси-

мальная температура воздуха в вертикальном солнечном коллекторе составляет порядка 70°C при разнице температур около 30°C .

Таким образом, разница $(t_s - t_o)$ лежит в пределах:

$$(t_s - t_o) = 30 \pm 10^{\circ}\text{C}. \quad (2.20)$$

Отметим на рис. 2.7 интервал (2.20). Зона рабочих скоростей воздуха в вытяжной трубе находится в пределах $1 \pm 0,5$ м/с, которую обозначили на рис. 2.7 штриховкой.

Поскольку общей высотой трубы будет являться расстояние от основания гелиосушилки до верхнего обреза вытяжной трубы, то высота самой вытяжной трубы будет равна разности этого расстояния и высоты сушильной камеры:

$$H_T = H_{ГС} - H_{СК}, \text{ м}, \quad (2.21)$$

где $H_{ГС}$ - высота гелиосушилки, м;

$H_{СК}$ - высота сушильной камеры, м.

Таким образом, из рис. 2.7 видно, что максимальная высота гелиосушилки должна быть равна приблизительно 6 м.

Площадь верхнего коллектора будет равна:

$$F_B = H_T \cdot B, \text{ м}^2. \quad (2.22)$$

При ширине гелиосушилки более двух метров площадь верхнего коллектора будет определяться с учетом коэффициента K_y , учитывающий промежутки между отдельными частями вытяжной трубы. Это позволит уменьшить ветровую нагрузку на верхний коллектор.

2.3 Определение массы гравийного аккумулятора

Для обеспечения сушки зерна в ночное время, гелиосушилка должна иметь аккумулятор теплоты. При этом возникает вопрос выбора типа аккумулятора и его емкости или массы.

Аккумуляторы можно классифицировать по характеру физико-химических процессов, протекающих в теплоаккумулирующих материалах [130]:

- аккумуляторы емкостного типа, в которых используется теплоемкость нагреваемого (охлаждаемого) аккумулялирующего материала без изменения его агрегатного состояния (природный камень, галька, вода, водные растворы солей и др.);
- аккумуляторы фазового перехода вещества, в которых используется теплота плавления (затвердевания) вещества;

- аккумуляторы энергии, основанные на выделении и поглощении теплоты при обратимых химических и фотохимических реакциях.

Аккумуляторы теплоты емкостного типа наиболее широко распространенные устройства для аккумуляирования тепловой энергии.

Так как солнечная активность в течение дня изменяется, то количество полезной солнечной энергии, уловленной коллектором за день, определяется как сумма соответствующих величин дня каждого часа дня:

$$Q_{пол} = \sum_{i=6}^{18} Q_i, \text{ Вт}\cdot\text{ч/день}, \quad (2.23)$$

где Q_i - количество полезной солнечной энергии, уловленной за i -й час дня.

Доля полезной энергии, которая может быть аккумуляирована за день, определяется коэффициентом:

$$K_1 = 0,25...0,35. \quad (2.24)$$

Тогда количества энергии, аккумуляируемой за день

$$Q_{ак} = K_1 \cdot Q_{пол}. \quad (2.25)$$

Средний тепловой поток при зарядке аккумулятора

$$Q_{зар.} = \frac{Q_{ак}}{n}, \text{ Вт}, \quad (2.26)$$

где n - число часов, в течение которых теплота поступает в аккумулятор, ч.

За величину n принимается то число часов, в течение которых плотность потока поступающей солнечной радиации отличается от максимального за день значения не более чем на 25%.

Объемный расход воздуха, поступающего в аккумулятор теплоты,

$$V_B = \frac{Q_{зар.}}{3600 \cdot \Delta t_g \cdot c_g}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.27)$$

где Δt_g - разность температур воздуха на входе и выходе аккумулятора, обычно $\Delta t_g = 7...10$ °C;

c_g - удельная объемная теплоемкость воздуха, Вт·ч/(м³·°C).

Требуемый объем аккумулятора теплоты

$$V_{ак} = \frac{Q_{ак}}{c_{ак} \cdot \Delta t_m}, \text{ м}^3, \quad (2.28)$$

где $c_{ак}$ - объемная теплоемкость галечного аккумулятора, Дж/(м³·°С);

Δt_m - изменение температуры твердых частиц (галечки) при подводе и отводе теплоты, $\Delta t_m = 0,5 \cdot \Delta t_{\epsilon} = 3,5 \dots 5$ °С.

Объемная теплоемкость галечного аккумулятора

$$c_{ак} = c_m \cdot \rho_m \cdot (1 - \epsilon), \quad (2.29)$$

где c_m - удельная теплоемкость твердых частиц, Дж/(кг·°С);

ρ_m - плотность твердых частиц, кг/м³;

ϵ - порозность слоя частиц.

По номограмме на рис. 2.8 [130] в зависимости от скорости потока воздуха и диаметра твердых частиц определяются удельные потери давления в слое $\Delta P/l$.

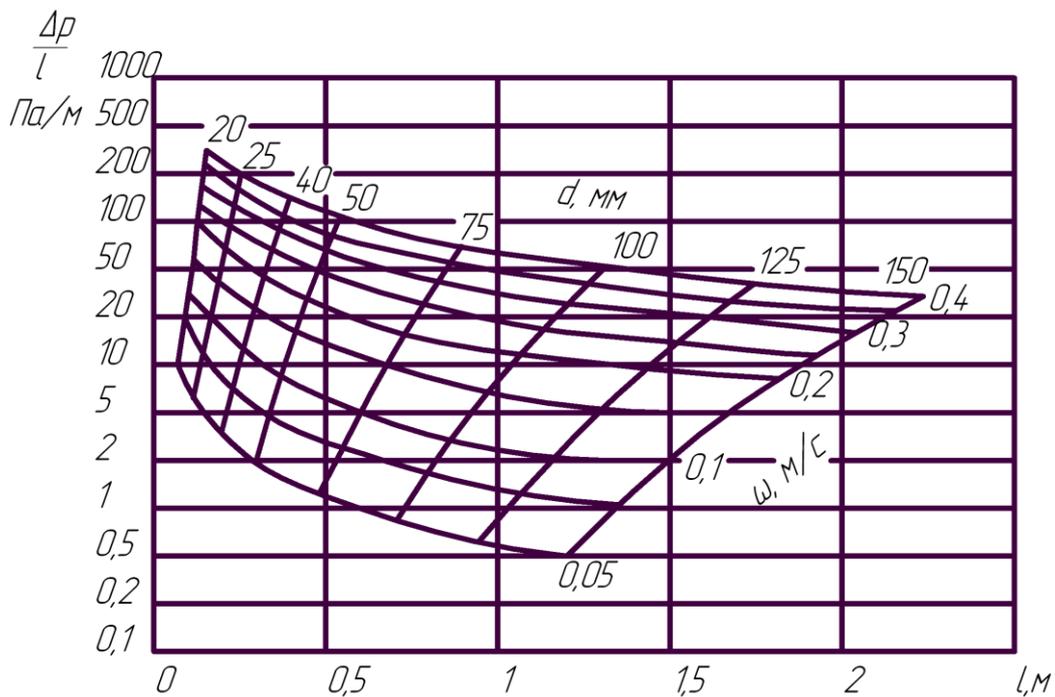


Рисунок 2.8 - Номограмма для расчета галечного аккумулятора теплоты

Общее сопротивление аккумулятора

$$\Delta P_{ст} = \frac{\Delta P}{l} \cdot l, \quad (2.30)$$

где l - высота (длина) аккумулятора, м.

Допустимое гидравлическое сопротивление принимается от 25 до 75 Па. Обычно для обеспечения эффективного теплообмена считается достаточной высота слоя в 500 мм при диаметре частиц не более 50 мм.

Скорость движения воздуха в аккумуляторе

$$v_a = \frac{L}{\rho_g \cdot f_{za}}, \text{ м/с} \quad (2.31)$$

где ρ_g - плотность воздуха, кг/м³;

f_{za} - площадь поперечного сечения аккумулятора, м².

2.4 Обоснование конструктивных параметров сушильного барабана

Основными конструктивными параметрами сушильного барабана является его диаметр D и длина l , определяющие важный эксплуатационный параметр - вместимость барабана V . Максимальный диаметр сушильного барабана определяется исходя из кинетики сушки неподвижного слоя зерна при конвективном теплообмене с сушильным агентом. Максимальная толщина слоя зерна с учетом коэффициента заполнения барабана и определяет его диаметр.

При сушке неподвижного плотного слоя зерна в камерных сушилках его толщина должна быть в пределах от 0,5 до 0,7 м, скорость сушильного агента от 0,1 до 0,2 м/с. При температуре сушильного агента порядка 45 °С воздух насыщается влагой за 1...2 с, зона сушки по толщине составляет от 0,1 до 0,4 м. Время сушки всего слоя составляет около 50 ч. При влажности зерна 18%, толщине слоя 0,7 м, температуре сушильного агента 40 °С и его расходе порядка 1500 м³/ч примерная продолжительность сушки составит около 12 ч [130].

Сушильный барабан представляет собой медленно вращающуюся оболочку. В этом случае рекомендуется соотношение диаметра барабана к его длине как:

$$\frac{D}{l} = 0,25 \dots 0,125. \quad (2.32)$$

Тогда длина барабана и, практически, длина фронта сушилки B будет равна:

$$l = B - 2g = \frac{D}{0,25 \dots 0,125}. \quad (2.33)$$

На основании рис. 2.9 площадь ограждений нижнего солнечного коллектора и сушильной камеры будет равна:

$$F = B \cdot L + B \cdot H + B \cdot c + (L - c - b) \frac{B}{\cos \alpha} + 2cH + 2bH + 2d \cdot (L - c - b) + (H - d) \cdot (L - c - b). \quad (2.34)$$

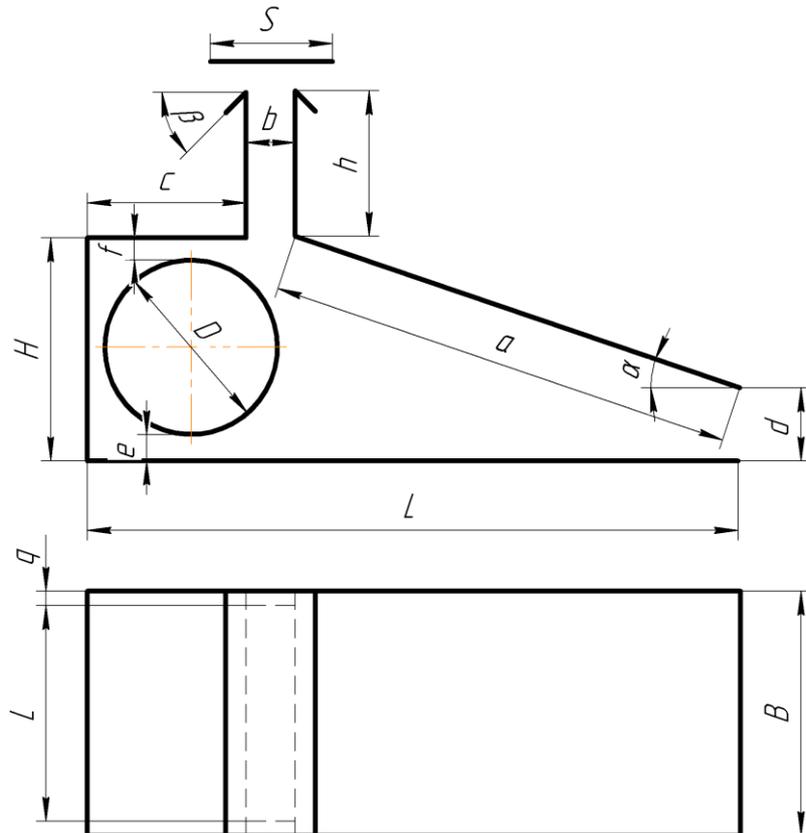


Рисунок 2.9 - Схема к обоснованию конструктивных параметров барабанной гелиосушки

После преобразований получим:

$$F = B \cdot (L + H + c) + 2H \cdot (c + b) + (L - c - b) \cdot \left(H + d + \frac{B}{\cos \alpha} \right), \quad (2.35)$$

где L - длина гелиосушки, м;

H - высотой сушильной камеры, м;

c - длина сушильной камеры, м;

b - толщина вытяжной трубы, м;

d - высота входного сечения нижнего коллектора, м;

α - угол наклона нижнего коллектора к горизонту, град.

Из рис. 2.9 получим следующие отношения:

$$c = K_D \cdot D,$$

$$H = D + e + f,$$

$$a = \frac{H - d}{\sin \alpha} = \frac{D + e + f - d}{\sin \alpha}, \quad (2.36)$$

$$L = a \cdot \cos \alpha + c = \operatorname{ctg} \alpha \cdot (D + e + f - d) + K_D \cdot D.$$

Подставив выражения (2.36) в (2.35), после преобразований

$$F = B \cdot (\operatorname{ctg} \alpha (D + e + f - d) + (K_D + 1) \cdot D + e + f + c) + 2 \cdot (D + e + f) \cdot (K_D \cdot D + b) + (\operatorname{ctg} \alpha (D + e + f - d) + K_D \cdot D - c - b) \cdot \left(D + e + f + d + \frac{B}{\cos \alpha} \right), \quad (2.37)$$

где e - расстояние от низа барабана до пола сушильной камеры, обеспечивающее размещение оборудования для разгрузки барабана, м;

f - расстояние от верха барабана до потолка сушильной камеры, обеспечивающее размещение оборудования для загрузки барабана, м;

K_D - отношение длины потолка сушильной камеры к диаметру барабана.

Площадь F является также расчетной при определении тепловых потерь через ограждения сушилки.

Масса зерна в сушильном барабане определяется по формуле:

$$m_3 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot l \cdot \rho_3 \cdot k_3, \quad (2.38)$$

где ρ_3 - насыпная плотность зерна, кг/м³;

k_3 - коэффициент заполнения барабана.

По данным [38, 49] в зависимости от влажности зерна

$$\rho_3 = 1388 - 3,2 \cdot \frac{100}{1 - \frac{\omega}{100}}. \quad (2.39)$$

Тогда количество зерна, приходящееся на единицу площади ограждений сушилки:

$$m_F = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot l \cdot \rho_3 \cdot k_3}{4F}, \text{ кг/м}^2. \quad (2.40)$$

С учетом выражений (2.33) и (2.38) ширина гелиосушки может быть представлена в виде:

$$B = \sqrt[3]{\frac{4m_3}{\pi \rho_3 \varphi \cdot (0,25 \dots 0,125)}} + 2g. \quad (2.41)$$

Загрузка и разгрузка сушильного барабана производится через люки в барабане с помощью пневматического зернопогрузчика.

Эффективная степень заполнения барабана согласно [6] будет равна

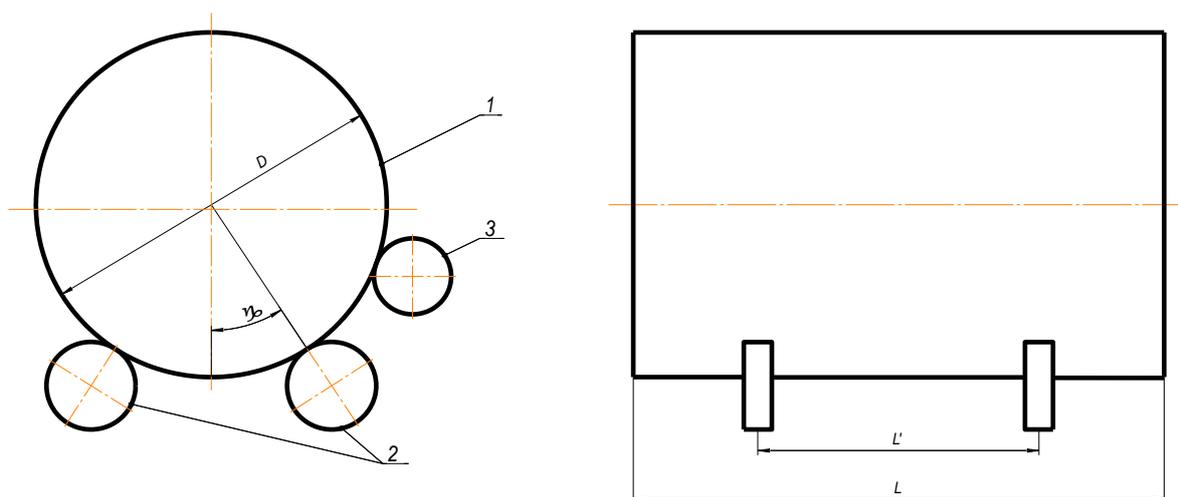
$$\xi_{\text{Э}} = \left(\frac{V_{\kappa}}{V_{\delta}} \right) \cdot 100\%, \quad (2.42)$$

где V_{κ} - объем зерна, находящийся в контакте с сушильным агентом;
 V_{δ} - внутренний объем барабана.

В данном случае объем V_{κ} будет равен объему зерна, находящемуся в барабане.

2.5 Обоснование конструктивных параметров и мощности привода барабана

Схема к обоснованию привода барабана представлена на рис. 2.10.



1 - сушильный барабан с зубчатым венцом; 2 - опорные ролики; 3 - ведущая шестерня привода барабана.

Рисунок 2.10 - Схема привода барабана

Для подобной схемы имеются следующие рекомендации:

$$\begin{aligned} \omega &= (0,4 \dots 0,8) \cdot D^{-0,5}, \\ l' &= 0,586 \cdot l, \\ v &\leq 1 \text{ м/с}, \\ \gamma' &= 30^\circ, \\ \Delta l &= \alpha \cdot (t_T - t_o) \cdot l'. \end{aligned} \quad (2.43)$$

где ω - угловая скорость вращения барабана, с^{-1} ;

- l' - расстояние между опорами барабана, м;
- v - окружная скорость вращения барабана, м/с;
- γ' - угол, под которым расположена опора, град.;
- Δl - удлинение барабана вследствие нагрева, м;
- α' - температурный коэффициент линейного расширения, $1/^\circ\text{C}$;
- t_T - температура нагрева барабана, град.;
- t_o - температура окружающей среды, град.

Для определения мощности, потребной на вращение барабана рассмотрим следующую схему на рис. 2.11.

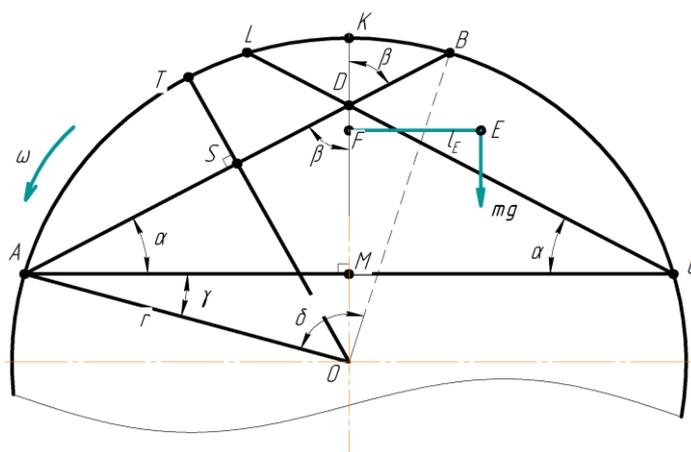


Рисунок 2.11 - Схема к определению мощности привода барабана (α - угол естественного откоса зерна при вращении барабана, град.)

Линия AB на рис. 2.11 - линия поверхности естественного откоса зерна при вращении барабана. Мощность, требуемая для привода сушильного барабана, складывается из мощности на преодоление сил трения в опорах и зубчатой передаче, сообщение кинетической энергии сушильному барабану с массой зерна и преодоление момента сопротивления от действия силы тяжести массы зерна, заключенной в объёме фигуры BDC с приложением силы в центре тяжести фигуры точки E на плече $FE = l$.

Энергией зерна, скатывающегося по поверхности естественного откоса, способствующей вращению барабана, пренебрегаем.

Мощность на преодоление сил в опорах и передаче учтём через коэффициенты полезного действия опор и передачи.

Необходимо определить массу зерна, заключённую в объёме фигуры BDC . Площадь фигуры BDC будет равна площади сегмента на хорде AB за вычетом двух площадей фигуры BDK .

Рассмотрим сегмент на хорде AB , т.к. треугольник ADC равносторонний и сегменты на хордах AB и LC равны.

Так как сушильный барабан заполняется с коэффициентом заполнения K , то площадь сегмента на хорде AB :

$$S_{\text{сегмента}}^{AB} = (1 - K) \cdot \pi \cdot r^2. \quad (2.44)$$

С другой стороны $S_{\text{сегмента}}^{AB}$ найдем как разницу площади сектора AOB и треугольника AOB .

Площадь сектора AOB :

$$S_{\text{сектора}}^{AOB} = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot \delta}{360}, \quad (2.45)$$

где δ - центральный угол сектора, град.

Площадь треугольника AOB :

$$S_{\text{треугольника}}^{AB} = \frac{1}{2} r^2 \cdot \sin \delta. \quad (2.46)$$

Тогда

$$S_{\text{сегмента}}^{AB} = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot \delta}{360} - \frac{1}{2} r^2 \cdot \sin \delta. \quad (2.47)$$

Приравняем выражения (2.44) и (2.47):

$$\begin{aligned} (1 - K) \cdot \pi \cdot r^2 &= \frac{\pi \cdot r^2 \cdot \delta}{360} - \frac{1}{2} r^2 \cdot \sin \delta, \\ (1 - K) \cdot \pi &= \frac{\pi \cdot \delta}{360} - \frac{1}{2} \sin \delta, \\ (1 - K) &= \frac{\delta}{360} - \frac{1}{2\pi} \sin \delta. \end{aligned} \quad (2.48)$$

Из выражения (2.48) подбором находим значение δ . Так, например, при $K = \frac{3}{4}$ (т.е. заполнение барабана на $\frac{3}{4}$) угол $\delta = 90^\circ$.

Определим площадь фигуры BDK .

$$l_{AB} = 2r \cdot \sin \frac{\delta}{2}. \quad (2.49)$$

Угол $\beta = 90^\circ - \alpha$.

Из треугольника AOB угол

$$\gamma = 90^\circ - \alpha - \frac{\delta}{2}. \quad (2.50)$$

Длина отрезка AM

$$l_{AM} = r \cdot \cos \gamma. \quad (2.51)$$

Тогда длина отрезка AD

$$l_{AD} = \frac{l_{AM}}{\cos \alpha} = \frac{r \cdot \cos \gamma}{\cos \alpha}. \quad (2.52)$$

Длина отрезка DB с учетом (2.49) и (2.52)

$$l_{DB} = l_{AB} - l_{AD} = 2r \cdot \sin \frac{\delta}{2} - r \cdot \frac{\cos \gamma}{\cos \alpha} = r \cdot \left(2 \sin \frac{\delta}{2} - \frac{\cos \gamma}{\cos \alpha} \right). \quad (2.53)$$

Длина отрезка DK

$$l_{DK} = r - l_{DM} - l_{MO}, \quad (2.54)$$

где $l_{DM} = l_{AD} \cdot \sin \alpha = \frac{r \cdot \cos \gamma}{\cos \alpha} \cdot \sin \alpha = r \cdot \cos \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha,$

$$l_{MO} = r \cdot \sin \gamma. \quad (2.55)$$

Тогда

$$l_{DK} = r - r \cdot \cos \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha - r \cdot \sin \gamma = r(1 - \cos \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha - \sin \gamma). \quad (2.56)$$

Принимаем допущение, что площадь фигуры BDK равна площади треугольника BDK . Тогда площадь треугольника BDK

$$\begin{aligned} S_{BDK} &= \frac{1}{2} r \left(2 \sin \frac{\delta}{2} - \frac{\cos \gamma}{\cos \alpha} \right) \cdot r(1 - \cos \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha - \sin \gamma) \cdot \sin \beta = \\ &= r^2 \left(\sin \frac{\delta}{2} - \frac{\cos \gamma}{2 \cos \alpha} \right) \cdot (1 - \cos \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha - \sin \gamma) \cdot \sin \beta. \end{aligned} \quad (2.57)$$

Окончательно площадь фигуры BCD с учётом (2.47) и (2.57)

$$\begin{aligned} S_{BCD} &= \frac{\pi \cdot r^2 \cdot \delta}{360} - \frac{1}{2} r^2 \cdot \sin \delta - 2r^2 \cdot \left(\sin \frac{\delta}{2} - \frac{\cos \gamma}{2 \cos \alpha} \right) \cdot (1 - \cos \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha - \sin \gamma) \cdot \sin \beta = \\ &= r^2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \delta}{360} - \frac{1}{2} \cdot \sin \delta - 2 \cdot \left(\sin \frac{\delta}{2} - \frac{\cos \gamma}{2 \cos \alpha} \right) \cdot (1 - \cos \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha - \sin \gamma) \cdot \sin \beta \right). \end{aligned} \quad (2.58)$$

Тогда масса зерна в объёме фигуры BCD

$$m_{BCD} = S_{BCD} \cdot l \cdot \rho_s, \text{ кг} \quad (2.59)$$

$$m_{BCD} = r^2 \cdot l \cdot \rho_3 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \delta}{360} - \frac{1}{2} \sin \delta - 2 \cdot \left(\sin \frac{\delta}{2} - \frac{\cos \gamma}{2 \cos \alpha} \right) \cdot (1 - \cos \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha - \sin \gamma) \cdot \sin \beta \right). \quad (2.60)$$

Момент сопротивления от действия силы тяжести, приложенной к центру масс в точке E , при допущении $l_E = \frac{1}{2} r$.

$$M_E = m_{BCD} g l_E = \frac{1}{2} g \cdot r^3 \cdot \rho_3 \cdot l \cdot \left(\frac{\pi \cdot \delta}{360} - \frac{1}{2} \sin \delta - 2 \cdot \left(\sin \frac{\delta}{2} - \frac{\cos \gamma}{2 \cos \alpha} \right) \cdot (1 - \cos \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha - \sin \gamma) \cdot \sin \beta \right). \quad (2.61)$$

Тогда мощность на преодоление момента сопротивления

$$N_C = M_E \cdot \omega = \frac{1}{2} g \cdot r^3 \cdot l \cdot \rho_3 \cdot \omega \cdot \left(\frac{\pi \cdot \delta}{360} - \frac{1}{2} \sin \delta - 2 \cdot \left(\sin \frac{\delta}{2} - \frac{\cos \gamma}{2 \cos \alpha} \right) \cdot (1 - \cos \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha - \sin \gamma) \cdot \sin \beta \right), \quad (2.62)$$

Мощность на сообщение кинетической энергии сушильному барабану с зерном

$$N_{\delta} = \frac{J \cdot \omega^2}{2}, \quad (2.63)$$

где - J - момент инерции сушильного барабана с зерном, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Момент инерции относительно оси вращения

$$J = J_{\delta} + J_3, \quad (2.64)$$

где J_{δ} - момент инерции пустого барабана;

J_3 - момент инерции зерновой массы.

Момент инерции барабана определим как момент инерции круглого цилиндра

$$J_{\delta} = \frac{M_{\delta} \cdot r^2}{2}. \quad (2.65)$$

Момент инерции зерновой массы

$$J_3 = J_3^{\Pi} - J_3^{AB}, \quad (2.66)$$

где J_3^{Π} - момент инерции зерновой массы при полном заполнении барабана;

J_3^{AB} - момент инерции зерновой массы в объеме сегмента на хорде AB .

Тогда

$$J_3^{\Pi} = \frac{M_3 \cdot r^2}{2} = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot l \cdot \rho_3 \cdot r^3}{2} = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot l \cdot \rho_3}{2}. \quad (2.67)$$

Момент инерции зерновой массы с учетом (2.47)

$$J_3^{AB} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\pi \cdot r^2 \cdot \delta}{360} - \frac{1}{2} \cdot r^2 \cdot \sin \delta \right) \cdot l \cdot \rho_3 \cdot \rho^2, \quad (2.68)$$

где ρ - расстояние от центра вращения до центра масс сегмента.

Центр масс сегмента - точка P , находится на расстоянии двух пятых длины отрезка TS от точки S .

Из рис. 2.11

$$\rho = l_{OS} + \frac{2}{5} l_{ST}, \quad (2.69)$$

где l_{OS} - длина отрезка OS ;

l_{ST} - высота сегмента.

Длина отрезка

$$l_{OS} = r \cdot \cos(\alpha + \gamma). \quad (2.70)$$

Высота сегмента

$$l_{ST} = \frac{1}{2} \cdot l_{AB} \cdot \operatorname{tg} \frac{\delta}{4}. \quad (2.71)$$

С учётом (2.49)

$$l_{ST} = r \cdot \sin \frac{\delta}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\delta}{4}. \quad (2.72)$$

Тогда

$$\rho = r \cdot \cos(\alpha + \gamma) + \frac{2}{5} r \cdot \sin \frac{\delta}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\delta}{4} = r \cdot \left(\cos(\alpha + \gamma) + \frac{2}{5} \sin \frac{\delta}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\delta}{4} \right). \quad (2.73)$$

С учётом (2.73) выражение (2.68) будет иметь вид

$$J_3^{AB} = \frac{1}{2} r^4 \cdot \left(\frac{\pi \cdot \delta}{360} - \frac{1}{2} \sin \delta \right) \cdot l \cdot \rho_3 \cdot \left(\cos(\alpha + \gamma) + \frac{2}{5} \sin \frac{\delta}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\delta}{4} \right)^2. \quad (2.74)$$

Окончательно выражение (2.66) с учётом (2.67) и (2.74) имеет вид:

$$J_3 = \frac{r^4 \cdot l \cdot \rho_3}{2} \cdot \left(\pi - \left(\frac{\pi \cdot \delta}{360} - \frac{1}{2} \sin \delta \right) \cdot \left(\cos(\alpha + \gamma) + \frac{2}{5} \sin \frac{\delta}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\delta}{4} \right)^2 \right). \quad (2.75)$$

Тогда мощность на сообщение кинетической энергии сушильному барабану с зерном с учётом выражений (2.63), (2.64), (2.65) и (2.75)

$$N_{\delta} = \frac{1}{2} \omega^2 \cdot \left(\frac{M_{\delta} \cdot r^2}{2} + \frac{r^4 \cdot l \cdot \rho_3}{2} \cdot \left(\pi - \left(\frac{\pi \cdot \delta}{360} - \frac{1}{2} \sin \delta \right) \cdot \left(\cos(\alpha + \gamma) + \frac{2}{5} \sin \frac{\delta}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\delta}{4} \right)^2 \right) \right) = \quad (2.76)$$

$$\frac{r^2 \cdot \omega^2}{4} \cdot \left(M_{\delta} + r^2 \cdot l \cdot \rho_3 \cdot \left(\pi - \left(\frac{\pi \cdot \delta}{360} - \frac{1}{2} \sin \delta \right) \cdot \left(\cos(\alpha + \gamma) + \frac{2}{5} \sin \frac{\delta}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\delta}{4} \right)^2 \right) \right).$$

Мощность на привод сушильного барабана с учётом выражений (2.62) и (2.76) будет равна:

$$N_{np} = \frac{N_c + N_{\delta}}{\eta_{on} \eta_{nep}} = \frac{r^2 \cdot \omega}{2 \eta_{on} \eta_{nep}} \cdot \left(g \cdot r \cdot l \cdot \rho_3 \left(\frac{\pi \cdot \delta}{360} - \frac{1}{2} \sin \delta - 2 \cdot \left(\sin \frac{\delta}{2} - \frac{\cos \gamma}{2 \cos \alpha} \right) \cdot (1 - \cos \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha - \sin \gamma) \cdot \sin \beta \right) + \frac{\omega}{2} \cdot \left(M_{\delta} + r^2 \cdot l \cdot \rho_3 \left(\pi - \left(\frac{\pi \cdot \delta}{360} - \frac{1}{2} \sin \delta \right) \cdot \left(\cos(\alpha + \gamma) + \frac{2}{5} \sin \frac{\delta}{2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\delta}{4} \right)^2 \right) \right) \right), \quad (2.77)$$

где η_{on} - КПД опорных роликов;

η_{nep} - КПД зубчатой передачи привода.

2.6 Определение продолжительности процесса сушки

По классификации, предложенной академиком П.А. Ребиндером, все формы связи влаги с продуктом делятся на три группы: химическая связь, физико-химическая связь, физико-механическая связь. В процессе сушки пищевых продуктов удаляется, как правило, физико-химически и физико-механически связанная влага.

По классификации А.В. Лыкова зерно относится к капиллярно-пористым коллоидным материалам. Стенки капилляров таких материалов эластичны и при поглощении жидкости набухают, а при высушивании дают усадку.

Профессор Рудобашта С.П. в развитие классификации Лыкова А.В. предложил во всех массообменных процессах с твердой фазой делить материалы на непористые, капиллярно-пористые и коллоидные капиллярно-пористые.

В качестве определяющей характеристики Сажин Б.С. предложил принимать критический радиус пор, т.е. радиус наиболее тонких пор, из которых необходимо удалить влагу для достижения заданной конечной влажности.

Сушка влажного продукта продолжается до тех пор, пока парциальное давление пара у поверхности материала P_m больше парциального давления пара в воздухе P_g .

Когда $P_m = P_g$ наступает состояние динамического равновесия, которому соответствует равновесная влажность материала ω_p .

Величина равновесной влажности зависит от относительной влажности воздуха:

$$\varphi = \frac{P_g}{P_n}, \quad (2.78)$$

где P_n - давление насыщенного пара при данной температуре, мм рт. ст.

Для большинства продуктов с повышением температуры равновесная влажность уменьшается. Относительная влажность воздуха также уменьшается с повышением его температуры, т.е. увеличивается его сушильная способность.

В интервале температур t от 0 до 100 °С P_n можно рассчитать по эмпирической формуле Т.К. Филоненко:

$$\lg P_n = 0,622 + \frac{7,5 \cdot t}{238 + t}. \quad (2.79)$$

Важным параметром, используемым в расчетах сушильных установок, является влагосодержание воздуха:

$$d = 0,622 \cdot \frac{\varphi \cdot P_n}{P - \varphi \cdot P_n}, \quad (2.80)$$

где P - общее давление влажного воздуха, мм рт. ст.

Значение влагосодержание воздуха используется для определения его энтальпии:

$$I = c_{c.s.} \cdot t + d \cdot i_n, \quad (2.81)$$

где $c_{c.s.}$ - средняя удельная теплоемкость абсолютно сухого воздуха, Дж/(кг·°С);

i_n - энтальпия водяного пара, кДж/кг.

Водяной пар находится в процессе сушки в перегретом состоянии в смеси с воздухом, тогда энтальпия перегретого пара

$$i_n = r_o + c_n \cdot t, \quad (2.82)$$

где r_o - энтальпия водяного пара при 0°C ;

c_n - удельная теплоемкость пара.

Кроме d , φ и I , при расчетах процесса сушки необходимо знать плотность влажного воздуха:

$$\rho_{\text{вл.в.}} = \frac{P - 0,378 \cdot P_g}{287 \cdot t}. \quad (2.83)$$

С увеличением влажности воздух становится легче, что облегчает его удаление через вытяжную трубу гелиосушилки.

Основным уравнением кинетики сушки, устанавливающим взаимосвязь между теплообменом и массообменом во времени, является уравнение:

$$q_n(\tau) = \left(\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right) \cdot (1 + R_g) = \left(\frac{d\bar{u}}{d\tau} \right) \cdot \left(1 + \frac{B}{K_o} \right), \quad (2.84)$$

где $q_n(\tau)$ - количество производимой теплоты;

$\frac{d\bar{u}}{d\tau}$ - изменение влагосодержание материала;

R_g - критерий Ребиндера;

K_o - критерий Кирпичёва;

B - безразмерный температурный коэффициент сушки, равный произведению критерия Ребиндера на критерий Кирпичёва.

$$B = K_o \cdot R_g = \frac{\frac{dt}{T_c}}{\frac{du}{u_o}} = b \frac{u_o}{T_c}. \quad (2.85)$$

Расчет времени сушки по выражению (2.84) представляет значительную сложность. Поэтому на практике наиболее распространен метод расчета продолжительности сушки с использованием коэффициента скорости сушки K_c , предложенный А.В. Лыковым. Согласно этому методу продолжительность сушки в периоде постоянной скорости сушки

$$\tau_1 = \frac{\omega_{\text{зн.}} - \omega_{\text{кр1}}}{N}, \quad (2.86)$$

где $\omega_{з.н.}$ - начальная влажность зерна, %;
 $\omega_{кр1}$ - первая критическая влажность, %;
 N - скорость сушки, %/ч.

Уравнение кривой скорости сушки для периода убывающей скорости сушки имеет вид:

$$N = \frac{d\omega}{d\tau} = K_c (\omega_{к.н.} - \omega_p) \quad (2.87)$$

где K_c - коэффициент скорости сушки в первый период, предложенный А.В. Лыковым;
 $\omega_{к.н.}$ - влажность материала в начале второго периода сушки, %;
 ω_p - равновесная влажность, %.

$$K_c = \frac{N}{\omega_{к.н.} - \omega_p} \quad (2.88)$$

То есть, кривая скорости сушки во втором периоде аппроксимируется прямой линией.

В результате интегрирования в пределах от $\omega_{к.н.}$ до $\omega_{з.к.}$ (конечная влажность материала) выражения 2.87 с учетом выражения 2.86 и того, что $\omega_{кр1} = \omega_{к.н.}$ общая продолжительность сушки составит:

$$\tau_{сум.} = \tau_1 + \tau_2 = \frac{1}{N} \left[\omega_{з.н.} - \omega_{к.н.} + 2,3 \cdot (\omega_{к.н.} - \omega_p) \cdot \lg \frac{\omega_{к.н.} - \omega_p}{\omega_{з.к.} - \omega_p} \right] \quad (2.89)$$

Здесь значение коэффициента N , влажности $\omega_{к.н.}$ определяется по результатам экспериментальных исследований. В периоде постоянной скорости сушки значение N можно определить по формуле:

$$N = \frac{3,6 \cdot L(d_{1cp} - d_0)}{m_e} \cdot 100\% \quad (2.90)$$

Тогда, с учетом выражения массы удаляемой влаги в зависимости от начальной и конечной влажности зерна и выражений (2.89) и (2.90) общая продолжительность сушки может быть определена по формуле:

$$\tau_{сум.} = \frac{m_{з.н.} \cdot (\omega_{з.н.} - \omega_{з.к.})}{360 \cdot L(d_{1cp} - d_0) \cdot (100 - \omega_{з.к.})} \cdot \left[\omega_{з.н.} - \omega_{к.н.} + 2,3 \cdot (\omega_{к.н.} - \omega_p) \cdot \lg \frac{\omega_{к.н.} - \omega_p}{\omega_{з.к.} - \omega_p} \right] \quad (2.91)$$

Относительно формулы 2.89 выражение 2.91 учитывает кроме того массу высушиваемого зерна, расход сушильного агента и величину влагосъема.

2.7 Критерий обоснования конструктивно-технологических параметров барабанной гелиосушилки зерна

Одним из наиболее распространенных критериев обоснования конструктивно-технологических параметров технических средств является критерий минимума прямых эксплуатационных затрат [135].

Прямые эксплуатационные затраты на сушку зерна в барабанной гелиосушилке

$$C_{\text{э}} = Z_A + Z_{\text{ТО}} + Z_{\text{ЗП}} + Z_{\text{ЭЛ}} \rightarrow \min, \text{ руб./т}, \quad (2.92)$$

где - Z_A - затраты на реновацию сушилки;

$Z_{\text{ТО}}$ - затраты на техническое обслуживание и ремонт сушилки;

$Z_{\text{ЗП}}$ - затраты на заработную плату обслуживающего персонала;

$Z_{\text{ЭЛ}}$ - затраты на электроэнергию.

Затраты на реновацию

$$Z_A = \frac{K_m \cdot H_a \cdot C_{\text{зс}}}{100 \cdot T_s \cdot W_q}, \quad (2.93)$$

где K_m - коэффициент, учитывающий затраты на монтаж сушилки;

H_a - коэффициент амортизационных отчислений на реновацию сушилки;

$C_{\text{зс}}$ - балансовая стоимость сушилки, руб.;

T_s - сезонная загрузка сушилки, ч;

W_q - приведенная условная часовая производительность сушилки, т/ч.

Балансовую стоимость сушилки $C_{\text{мс}}$ с учетом ее конструкции представим в виде:

$$C_{\text{зс}} = C_{\text{нк}} + C_{\text{га}} + C_{\text{к}} + C_{\text{б}} + C_{\text{вк}}, \quad (2.94)$$

где $C_{\text{нк}}$ - стоимость нижнего солнечного коллектора сушилки;

$C_{\text{га}}$ - стоимость гравийного аккумулятора;

$C_{\text{к}}$ - стоимость сушильной камеры;

$C_{\text{б}}$ - стоимость сушильного барабана с приводом;

$C_{\text{вк}}$ - стоимость верхнего солнечного коллектора с дефлектором.

Стоимость нижнего солнечного коллектора сушилки

$$C_{нк} = C_{F_H} \cdot F_H, \quad (2.95)$$

где C_{F_H} - стоимость 1 м² нижнего солнечного коллектора сушилки, руб./м²;
 F_H - площадь нижнего солнечного коллектора сушилки, определяемая по выражению (2.11), м².

Стоимость гравийного аккумулятора

$$C_{га} = M_{ак} \cdot C_{ак} + F_{ак} \cdot C_{оз} + C_{ш} + C_{сет}, \quad (2.96)$$

где $M_{ак}$ - масса гравия в аккумуляторе сушилки, кг;
 $C_{ак}$ - стоимость 1 кг гравия, руб./кг;
 $F_{ак}$ - площадь ограждений гравийного аккумулятора, м²;
 $C_{оз}$ - стоимость 1 м² ограждений гравийного аккумулятора, руб./м²;
 $C_{ш}$ - стоимость шторы гравийного аккумулятора, руб.;
 $C_{сет}$ - стоимость сетки гравийного аккумулятора, руб.

Массу гравия, стоимость шторы и стоимость сетки гравийного аккумулятора примем в виде:

$$M_{ак} = K_{ак} \cdot m_з, \quad C_{ш} = K_{ш} \cdot B, \quad C_{сет} = K_{сет} \cdot B, \quad (2.97)$$

где $K_{ак}$ - масса гравия, приходящаяся на 1 кг высушиваемого зерна, кг/кг;
 $K_{ш}$ - стоимость шторы, приходящаяся на 1 м ширины гелиосушилки, руб./м;
 $K_{сет}$ - стоимость сетки, приходящаяся на 1 м ширины гелиосушилки, руб./м.

Стоимость сушильной камеры

$$C_{к} = F_{к} \cdot K_{к} + 2C_{ф}, \quad (2.98)$$

где $F_{к}$ - площадь ограждений сушильной камеры, м²;
 $K_{к}$ - стоимость 1 м² ограждений сушильной камеры, руб./м²;
 $C_{ф}$ - стоимость фартука сушильной камеры, руб.

Стоимость фартука сушильной камеры пропорциональна ширине сушилки

$$C_{ф} = K_{ф} \cdot B, \quad (2.99)$$

где $K_{ф}$ - стоимость фартука, приходящаяся на 1 м ширины сушилки руб./м.

Стоимость сушильного барабана с приводом

$$C_{\bar{o}} = C_{\bar{o}ap} + C_{np}, \quad (2.100)$$

где $C_{\bar{o}ap}$ - стоимость сушильного барабана, руб.;

C_{np} - стоимость привода барабана, руб.

Стоимость сушильного барабана примем пропорциональной массе загружаемого зерна в виде:

$$C_{\bar{o}ap} = K_{\bar{o}ap} \cdot m_z, \quad (2.101)$$

где $K_{\bar{o}ap}$ - стоимость сушильного барабана, приходящаяся на 1 кг массы загруженного в него зерна, руб./кг.

Стоимость верхнего солнечного коллектора с дефлектором

$$C_{\text{вк}} = F_B \cdot C_{F_B} + C_{\text{деф}}, \quad (2.102)$$

где F_B - площадь верхнего солнечного коллектора, м²;

C_{F_B} - стоимость 1 м² площади верхнего солнечного коллектора, руб./м²;

$C_{\text{деф}}$ - стоимость дефлектора, руб.

Площадь верхнего солнечного коллектора и стоимость дефлектора также примем в функции ширины гелиосушилки в виде:

$$F_B = K_{\text{вк}} \cdot B, \quad C_{\text{деф}} = K_{\text{деф}} \cdot B, \quad (2.103)$$

где $K_{\text{вк}}$ - площадь верхнего солнечного коллектора, приходящаяся на 1 м ширины гелиосушилки, м²/м;

$K_{\text{деф}}$ - стоимость дефлектора, приходящаяся на 1 м ширины гелиосушилки, руб./м.

Условную часовую производительность сушилки определим в виде:

$$W_q = \frac{10^{-3} \cdot m_z}{\tau_{\text{суш.}}}, \quad (2.104)$$

где $\tau_{\text{суш.}}$ - время сушки зерна до кондиционной влажности, ч.

Затраты на техническое обслуживание и ремонт сушилки

$$Z_{TO} = \frac{C_{\text{э}} \cdot H_{TO}}{100 \cdot (T_{\text{загр.}} \cdot W_{\text{ч}})}, \quad (2.105)$$

где H_{TO} - коэффициент амортизационных отчислений на техническое обслуживание и ремонт сушилки.

Затраты на заработную плату обслуживающего персонала

$$Z_{\text{ЗП}} = \frac{C_m \cdot K_{\text{сл}} (1 + K_{\text{дон}}) \cdot L}{W_{\text{ч}}}, \quad (2.106)$$

где C_m - тарифная ставка обслуживающего персонала, руб./ч;

$K_{\text{сл}}$ - коэффициент сложности работ;

$K_{\text{дон}}$ - размер дополнительной оплаты труда, %;

L - число обслуживающего персонала, чел.

Затраты на электроэнергию

$$Z_{\text{ЭЛ}} = \frac{N_{\text{эл}} \cdot Ц_{\text{эл}}}{W_{\text{ч}}}, \quad (2.107)$$

где $N_{\text{эл}}$ - мощность привода сушильного барабана, кВт;

$Ц_{\text{эл}}$ - стоимость 1 кВт·ч.

В выражения (2.92-2.107) входят величины, имеющие переменное значение в течение периода сушки. Поэтому при реализации модели в выражения подставляются средние значения соответствующих величин, полученные на основании обработки статистических данных и рассчитанные на основе установленных регрессионных зависимостей.

Таким образом, изменяя значение заданной производительности сушилки, по критерию (2.92) определяем минимум прямых эксплуатационных затрат на сушку зерна и соответствующие ему конструктивно-технологические параметры гелиосушки.

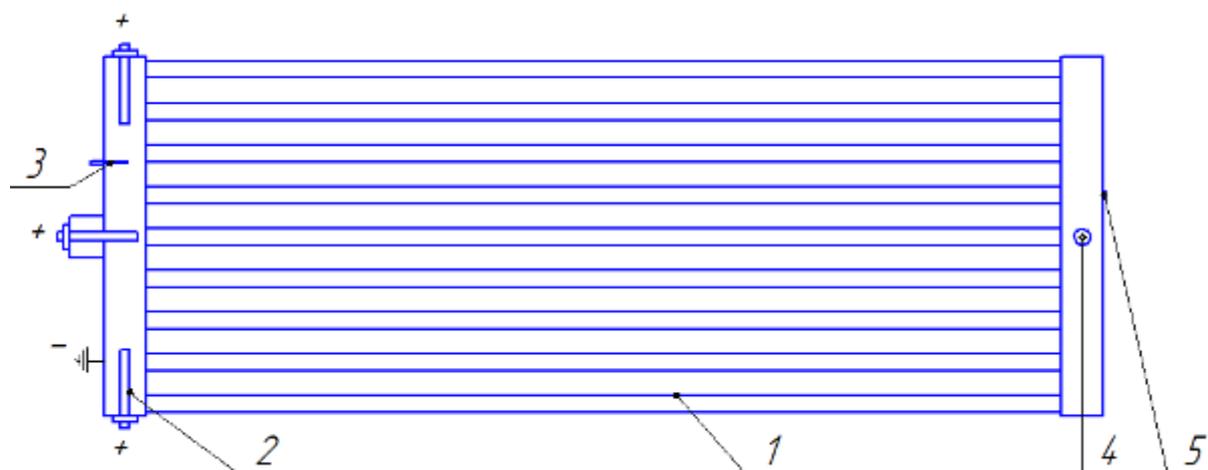
Глава 3 Обоснование параметров водяного аккумулятора теплоты и систем активной вентиляции и электроподогрева сушильного агента барабанной гелиосушилки зерна

3.1 Обоснование параметров водяного аккумулятора теплоты барабанной гелиосушилки

Для уменьшения материалоемкости барабанной гелиосушилки целесообразна замена существующего гравийного аккумулятора теплоты на водяной аккумулятор, одна из стенок которого будет одновременно являться теплопринимающей поверхностью горизонтального солнечного коллектора сушилки. Данный вид аккумулятора позволит не только уменьшить материалоемкость сушилки, но и в дальнейшем сделать данную сушилку мобильной, что позволит лучше ориентироваться по отношению к солнцу в течение рабочего дня, а также сократить расстояние от сушилки до места хранения зерна.

Водяной аккумулятор теплоты позволит также интенсифицировать процесс сушки, за счет более высокой температуры нагрева и теплоотдачи.

Водяной аккумулятор теплоты состоит из заполненных водой полых и окрашенных черным цветом металлических труб 1. Для подогрева воды при плохих погодных условиях аккумулятор имеет встроенные электронагреватели 2, датчик температуры воды 3, а также заливную горловину 4 и контрольное отверстие 5 (рис. 3.1).



1 – трубы полые металлические; 2 – электронагреватели; 3 – датчик температуры воды; 4 – горловина заливная; 5 – отверстие контрольное

Рисунок 3.1 – Конструкция водяного аккумулятора теплоты

Солнечная энергия быстро нагревает металлические трубы аккумулятора, что обеспечивает более высокую температуру его поверхности в сравнении с гравийным. Часть поглощенной теплоты аккумулируется водой.

Более горячая поверхность водяного аккумулятора сильнее нагревает сушильный агент, что способствует увеличению температуры нагрева и соответ-

ственно скорости сушки продукта. Если температура воды в аккумуляторе падает ниже заданного уровня, то включаются встроенные электронагреватели, что поддерживает необходимую температуру агента сушки.

При этом возникает необходимость определения его вместимости. Вместимость должна быть такой, чтобы запас аккумулированной теплоты был не меньше, чем в гравийном аккумуляторе теплоты.

Количество накопленной энергии за световой день вычисляется по формуле:

$$Q = m \cdot c \cdot (T_{\text{кон}} - T_0), \text{кДж}, \quad (3.1)$$

где m - масса вещества, кг;

c - удельная теплоемкость, кДж/(кг·°С);

$T_{\text{кон}} - T_0$ - разность значений температур вещества, аккумулирующего теплоту, в конце и начале зарядки, °С.

Количество энергии, накопленной в течение светового дня, относительно гравийного аккумулятора теплоты вычисляется по формуле:

$$Q = m_{\text{гр}} \cdot c_{\text{гр}} \cdot (T_{\text{кон гр}} - T_0), \text{кДж}, \quad (3.2)$$

где $m_{\text{гр}}$ - масса гравия, кг;

$c_{\text{гр}}$ - удельная массовая теплоемкость гравия, кДж/(кг*°С);

$(T_{\text{кон гр}} - T_0)$ - разность значений температур гравия, аккумулирующего теплоту, в конце и начале зарядки, °С.

Количество энергии, накопленной в течение светового дня, относительно водяного аккумулятора теплоты вычисляется по формуле:

$$Q = m_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} \cdot (T_{\text{кон в}} - T_0), \text{кДж}, \quad (3.3)$$

где $m_{\text{в}}$ - масса воды, кг;

$c_{\text{в}}$ - удельная массовая теплоемкость воды, кДж/(кг*°С);

$(T_{\text{кон в}} - T_0)$ - разность значений температур воды, аккумулирующей теплоту, в конце и начале зарядки, °С.

Из выражений (3.2) и (3.3) требуемая масса воды находится по формуле:

$$m_{\text{в}} = \frac{c_{\text{гр}} \cdot m_{\text{гр}} \cdot (T_{\text{гр}} - T_0)}{c_{\text{в}} \cdot (T_{\text{в}} - T_0)}, \text{кг}. \quad (3.4)$$

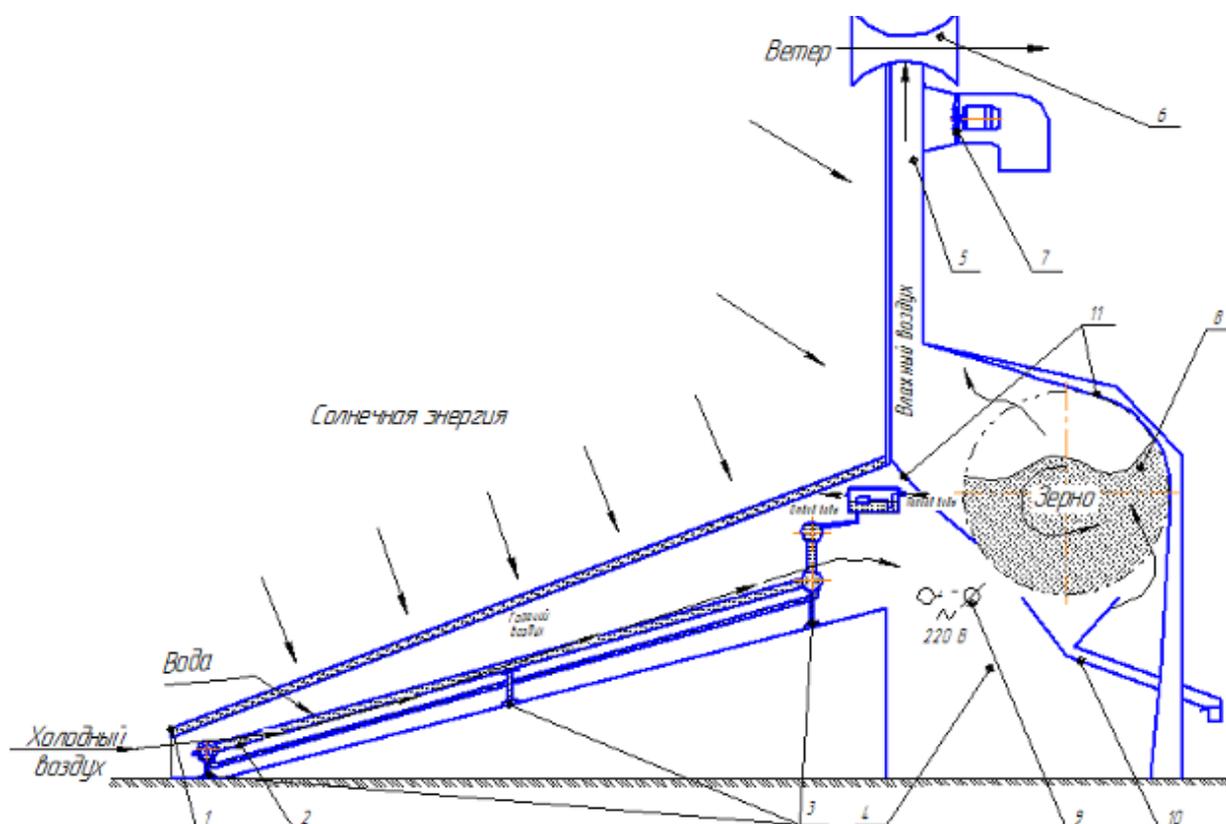
По известной массе воды затем определяем ее объем и, соответственно, объем водяного аккумулятора теплоты.

При массе гравийного аккумулятора 3000 кг и общей массе замещающего водяного аккумулятора – 364 кг снижение материалоемкости составит 8,2 раза.

3.2 Обоснование параметров систем активной вентиляции и электроподогрева сушильного агента барабанной гелиосушилки

Для интенсификации процесса сушки необходим быстрый нагрев зерновой массы с ее последующим активным вентилированием. Данного эффекта можно достичь использованием систем подогрева сушильного агента и активного вентилирования.

Система электроподогрева сушильного агента устанавливается под барабаном в сушильной камере, что позволяет дополнительно подогреть сушильный агент вначале процесса сушки, и представляет собой трубчатый электронагреватель установленной мощности и датчик температуры (рис. 3.2).



1 – солнечный коллектор; 2 – водяной аккумулятор теплоты; 3 – опоры водяного аккумулятора теплоты; 4 – камера сушильная; 5 – труба вытяжная; 6 – дефлектор; 7 – система вентиляции; 8 – барабан сушильный; 9 – система электроподогрева сушильного агента; 10 – выгрузной механизм; 11 - фартуки

Рисунок 3.2 – Схема барабанной гелиосушилки с системами подогрева и вентиляции сушильного агента

Данная система включается в ручном режиме в начале процесса сушки с целью увеличить скорость прогрева зерновой массы и по достижении установленной температуры электронагреватель отключается.

По данным [16] максимальная температура сушильного агента достигается около 14⁰⁰ часов дня при благоприятных погодных условиях. При этом она составляет около 60 °С.

Поэтому система дополнительного подогрева сушильного агента должна обеспечить догрев сушильного агента до данной температуры для обеспечения интенсификации процесса сушки с начала данного процесса.

Данная система также может быть использована и при неблагоприятных погодных условиях, а также в ночное время. Для этого на датчике устанавливается рабочий интервал. При достижении минимума датчик срабатывает, и включается электронагреватель, а при достижении максимума он отключается.

Требуемую мощность электронагревателя для начальных условий находим по формуле:

$$P = k \cdot (Q/t + P_{ном}), Вт, \quad (3.6)$$

где k – коэффициент, учитывающий запас мощности;

Q – необходимое количество теплоты для дополнительного подогрева агента сушки, Дж;

t – время работы нагревателя, с;

$P_{ном}$ – потери теплоты через ограждения, Вт.

Необходимое дополнительное количество теплоты Q определим из следующих соображений.

Поступающий из наклонного солнечного коллектора сушильный агент заполняет объем сушильной камеры, подогревается, проходит через слой зерна в сушильном барабане и удаляется в вытяжную трубу. Таким образом, принимаем время дополнительного подогрева сушильного агента равным времени его расхода через вытяжную трубу в объеме, равном объему сушильной камеры.

Объем сушильной камеры (рисунок 3.3)

$$V_k = abh - \pi D^2 b, м^3, \quad (3.7)$$

где a – длина сушильной камеры, м;

b – ширина сушильной камеры, м;

h – высота сушильной камеры, м;

D – диаметр сушильного барабана, м.

Расход сушильного агента через вытяжную трубу:

$$L_T = cbV_a, м^3/с, \quad (3.8)$$

где c – толщина вытяжной трубы, м;

V_a – скорость движения сушильного агента в вытяжной трубе, м/с.

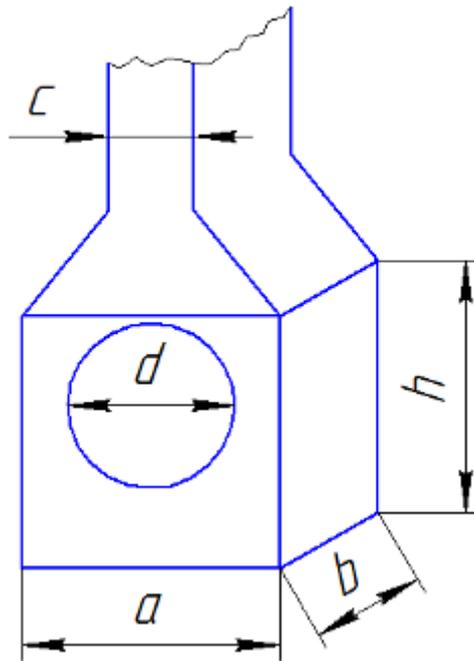


Рисунок 3.3 – Схема к определению объема сушильной камеры

Время прохождения данного объема сушильного агента через вытяжную трубу

$$t = \frac{V_{\text{к}}}{L_T}, \text{ с.} \quad (3.9)$$

За время t сушильный агент получит дополнительное количество теплоты

$$Q = V_{\text{к}} c_{c.a} (T_2 - T_1), \quad (3.10)$$

где $c_{c.a}$ – объемная теплоемкость сушильного агента, Дж/(м³·°С);

T_2 – конечная температура нагрева, °С;

T_1 – температура сушильного агента на входе в сушильную камеру, °С.

Потери теплоты в окружающую среду за время t

$$P_{\text{пот}} = \frac{Q_{\text{пот}}}{t} = \frac{k_{\text{п}} F_{c.к} (T_2 - T_1)}{t}, \quad (3.11)$$

где $F_{c.к}$ – площадь ограждений сушильной камеры, м².

Тогда требуемая мощность электронагревателя

$$P = k L_T (T_2 - T_1) \left(c_{c.a} + \frac{k_{\text{п}} F_{c.к}}{V_{\text{к}}} \right). \quad (3.12)$$

В верхней части вытяжной трубы установлена система активной вентиляции в виде вытяжного вентилятора с заслонкой. Система позволяет увеличить расход агента сушки, а, значит, и повысить интенсификацию влагообмена, удаляя избыток влаги с поверхности зерна (см. рисунок 3.2). Вытяжные системы вентиляции сушилок в настоящее время являются наиболее перспективными системами организации циркулирования сушильного агента, как, например, в итальянских зерносушилках компании Strahl.

Данная система включается автоматически при падении скорости потока воздуха в вытяжной камере. При этом срабатывает датчик контроля потока воздуха и посылает сигнал на электромагнитный клапан воздушной заслонки вытяжной трубы гелиосушки. Заслонка перекрывает вытяжную трубу и включается вытяжной вентилятор, тем самым организовывая движение увлажненного воздуха с помощью системы, а не дефлектора.

Для системы активной вентиляции наиболее приемлем осевой вентилятор, имеющий относительно других типов больший расход и меньший напор. Требуемая мощность электродвигателя привода вентилятора находится по формуле:

$$P_{\text{дв}} = \frac{V \cdot H}{102 \cdot \eta \cdot 3600}, \text{ Вт}, \quad (3.13)$$

где V - производительность вентилятора, м³/ч;

H - создаваемый напор, кПа;

η – коэффициент полезного действия вентилятора.

Подачу вентилятора подбираем по требуемому расходу воздуха через вытяжную трубу.

3.3 Математическая модель барабанной гелиосушки зерна с системами активной вентиляции и электроподогрева сушильного агента

Для построения математической модели гелиосушки необходимо описать процесс сушки зерна в ней, и на ее основе составить и решить уравнение теплового баланса.

Схема процесса сушки зерна представлена на рис. 3.4.

Атмосферный воздух поступает в наклонный солнечный коллектор гелиосушки, где за счет солнечной энергии, улавливаемой тепловоспринимающей поверхностью аккумулятора теплоты, подогревается. Поступающая солнечная энергия нагревает металлическую тепловоспринимающую поверхность аккумулятора теплоты, от которой теплота отводится на нагрев воды в самом аккумуляторе теплоты, нагрев поступающего атмосферного воздуха, и часть теплоты идет на нагрев самого корпуса аккумулятора теплоты, а часть рассеивается в окружающей среде.

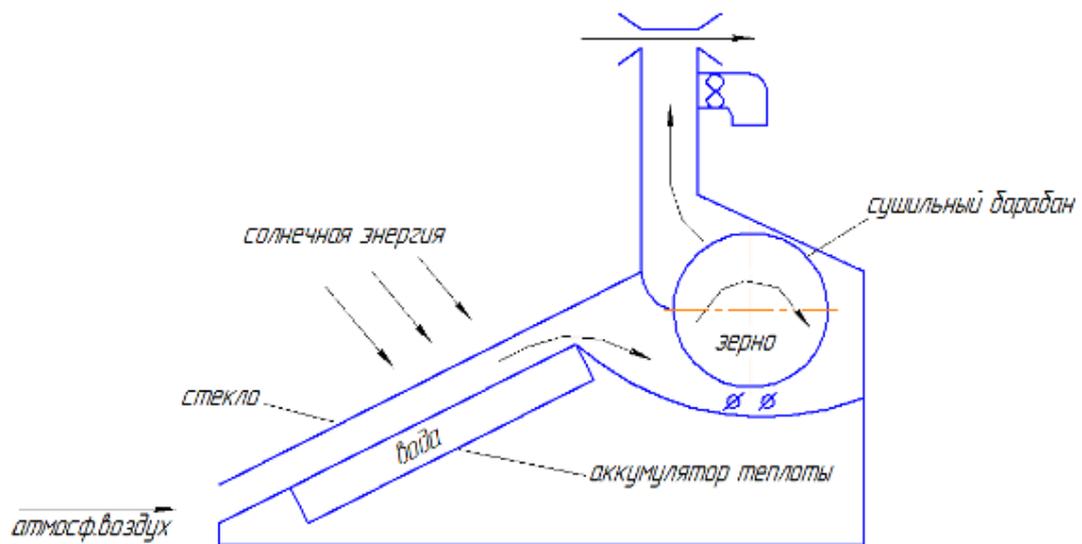


Рисунок 3.4 – Схема процесса сушки

На рис. 3.5 представлена функционально-параметрическая схема гелиосушки с водяным аккумулятором теплоты.

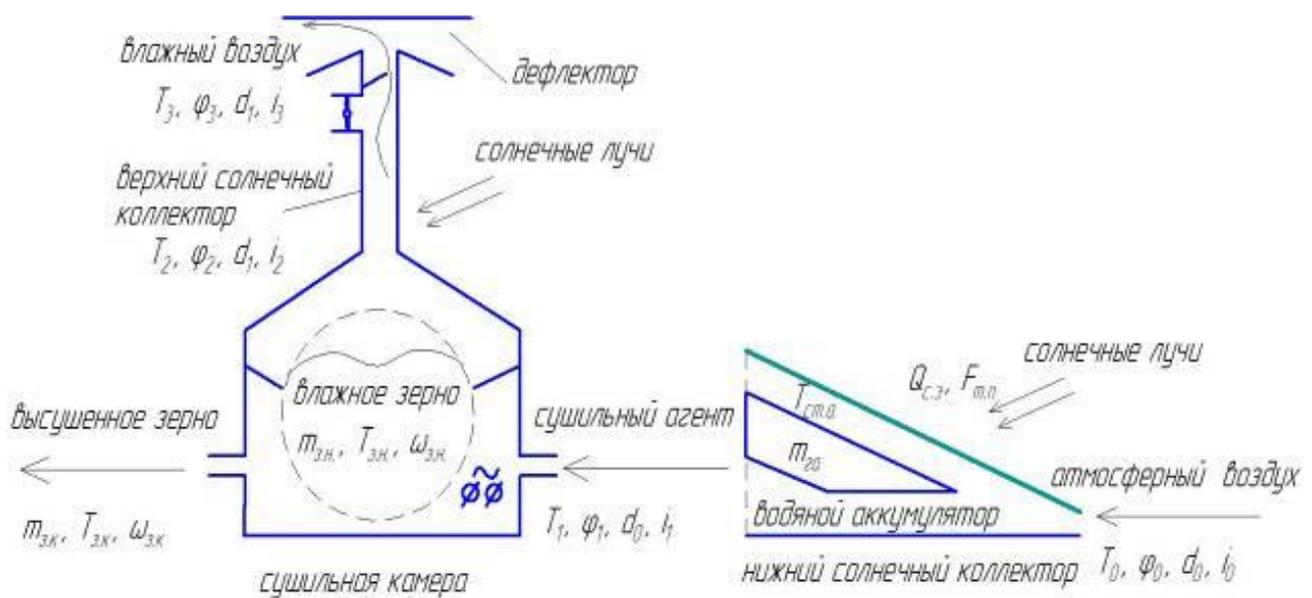


Рисунок 3.5 - Функционально-параметрическая схема

Уравнение теплового баланса гелиоколлектора за бесконечно малый промежуток времени dt :

$$dQ_{a.в.} + dQ_{c.э.} = dQ_{c.a.} + dQ_{ст.в.} + dQ_{г.} + dQ_{n.}, \text{ Дж}, \quad (3.14)$$

где $dQ_{a.в.}$ - теплота, поступившая с атмосферным воздухом в нижний гелиоколлектор;

$dQ_{c.э.}$ - теплота, поглощенная тепловоспринимающей поверхностью водяного аккумулятора, поступившая с солнечной энергией;

$dQ_{c.a.}$ - теплота, отведенной агентом сушки (подогретым атмосферным воздухом) после теплообмена с тепловоспринимающей поверхностью;

$dQ_{ст.а.}$ - теплота, идущая на нагрев стенок аккумулятора;

$dQ_{в.}$ - теплота, затраченная на подогрев воды в аккумуляторе;

dQ_n - теплота, теряемая в окружающую среду.

Определим выражения составляющих теплового баланса.

Количество теплоты, поступившей с атмосферным воздухом в нижний гелиоколлектор,

$$dQ_{a.в.} = L_0 i_0(t) dt, \quad (3.15)$$

где L_0 - расход атмосферного воздуха, кг/с;

$i_0(t)$ - энтальпия атмосферного воздуха в зависимости от времени в период сушки, Дж/кг.

Количество теплоты, поглощенной тепловоспринимающей поверхностью, поступившей с солнечной энергией

$$dQ_{c.э.} = q_{c.э.}(t) F_{т.п.} \varepsilon dt, \quad (3.16)$$

где $q_{c.э.}(t)$ - плотность потока солнечной энергии в зависимости от времени в период сушки, Вт/м²;

$F_{т.п.}$ - площадь тепловоспринимающей поверхности, м²;

ε - степень черноты поверхности.

Количество теплоты, отведенной агентом сушки после теплообмена с тепловоспринимающей поверхностью,

$$dQ_{c.a.} = L_0 i_1(t) dt, \quad (3.17)$$

где $i_1(t)$ - энтальпия сушильного агента в зависимости от времени в период сушки, Дж/кг.

Количество теплоты, идущей на нагрев стенок аккумулятора,

$$dQ_{ст.а.} = M_{ст.а.} C_{ст.а.} dT_{ст.а.}, \quad (3.18)$$

где $M_{ст.а.}$ - масса стенок аккумулятора, кг;

$C_{ст.а.}$ - теплоёмкость материала стенок аккумулятора, Дж/(кг·К);

$dT_{ст.а.}$ - приращение температуры стенок аккумулятора, К.

Количество теплоты, затраченной на подогрев воды в аккумуляторе,

$$dQ_{\varepsilon} = M_{\varepsilon} C_{\varepsilon} dT_{\varepsilon}, \quad (3.19)$$

где M_{ε} - масса воды в аккумуляторе, кг;
 C_{ε} - теплоёмкость воды, Дж/(кг·К);
 dT_{ε} - приращение температуры воды, К.

Потери теплоты в окружающую среду

$$dQ_n = kF(T_1(t) - T_{o.c.}(t))dt, \quad (3.20)$$

где k – коэффициент теплопередачи через ограждения гелиоколлектора, Вт/(м²·К);
 F - площадь ограждений гелиоколлектора, м²;
 $T_1(t)$ - температура сушильного агента в зависимости от времени в период сушки, К;
 $T_{o.c.}(t)$ - температура окружающей среды в зависимости от времени в период сушки, К.

Подставив выражения (3.15-3.20) в уравнение (3.14), после преобразований получим:

$$\begin{aligned} & \left(L_0 i_0(t) + q_{c.з.}(t) F_{m.n.} \varepsilon - L_0 i_1(t) - kF(T_1(t) - T_{o.c.}(t)) \right) dt = \\ & = M_{cт.а.} C_{cт.а.} dT_{cт.а.} + M_{\varepsilon} C_{\varepsilon} dT_{\varepsilon}. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Температура воды в аккумуляторе находится в прямой зависимости от температуры его стенок, т.е.

$$T_{\varepsilon} = a_{\varepsilon} T_{cт.а.} + b_{\varepsilon},$$

где $a_{\varepsilon}, b_{\varepsilon}$ – коэффициенты пропорциональности.

С учетом того, что $dT_{\varepsilon} = d(a_{\varepsilon} T_{cт.а.} + b_{\varepsilon}) = a_{\varepsilon} dT_{cт.а.}$ уравнение (3.21) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} & \left(L_0 i_0(t) + q_{c.з.}(t) F_{m.n.} \varepsilon - L_0 i_1(t) - kF(T_1(t) - T_{o.c.}(t)) \right) dt = \\ & = (M_{cт.а.} C_{cт.а.} + a_{\varepsilon} M_{\varepsilon} C_{\varepsilon}) dT_{cт.а.} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Требуется найти зависимость $T_{cт.а.} = f(t)$.

Для функций $i_0(t), i_1(t), q_{c.з.}(t); T_1(t)$ и $T_{o.c.}(t)$ известно, что:

$$i_0(t) = C_{c.в.} T_{o.c.}(t) + 0,001x(r_0 + C_{п} T_{o.c.}(t)), \quad (3.23)$$

$$i_1(t) = C_{c.в.} T_1(t) + 0,001x(r_0 + C_{п} T_1(t)), \quad (3.24)$$

где $C_{с.в.}$ - теплоемкость сухого воздуха, Дж/(кг·К);

x - влагосодержание воздуха, г/кг;

r_0 – удельная теплота парообразования при температуре 0 °С, Дж/кг;

$C_{п}$ – теплоемкость пара, Дж/(кг·К).

Подставляя выражения (3.23) и (3.24) в уравнение (3.22), получим

$$\begin{aligned} & \left(q_{с.э.}(t)F_{м.н.}\varepsilon - (T_1(t) - T_{о.с.}(t))(kF + L_0(C_{с.с.} + 0,001C_n)) \right) dt = \\ & = (M_{см.а.}C_{см.а.} + a_эM_эC_э)dT_{см.а.} \end{aligned} \quad (3.25)$$

Температура $T_{о.с.}(t)$ очевидным образом связана с солнечной активностью.

Примем, что

$$T_{о.с.}(t) = a_0q_{с.э.}(t) + b_0, \quad (3.26)$$

где a_0, b_0 – эмпирические коэффициенты.

При этом полагаем, что

$$q_{с.э.}(t) = a_{с.э.}t^2 + b_{с.э.}t + c_{с.э.} \quad (3.27)$$

где $a_{с.э.}, b_{с.э.}, c_{с.э.}$ - эмпирические коэффициенты.

Температура сушильного агента $T_1(t)$ также как и температура воды в аккумуляторе связана с температурой тепловоспринимающей поверхности:

$$T_1(t) = a_1T_{см.а.}(t) + b_1; \quad (3.28)$$

где a_1, b_1 - эмпирические коэффициенты.

Тогда с учетом выражений (3.26-3.28) уравнение (3.25) после преобразований будет иметь вид:

$$\begin{aligned} & ((a_{с.э.}t^2 + b_{с.э.}t + c_{с.э.})F_{м.н.}\varepsilon - (a_1T_{см.а.}(t) + b_1 - a_0(a_{с.э.}t^2 + b_{с.э.}t + c_{с.э.}) - \\ & - b_0)(kF + L_0(C_{с.с.} + 0,001C_n)))dt = (M_{см.а.}C_{см.а.} + a_эM_эC_э)dT_{см.а.} \end{aligned} \quad (3.29)$$

Введем обозначения:

$$K = kF + L_0(C_{с.с.} + 0,001xC_n);$$

$$K_1 = M_{см.а.}C_{см.а.} + a_эM_эC_э;$$

$$K_2 = a_{с.э.}(F_{м.н.}\varepsilon + a_0K);$$

$$K_3 = b_{c.э}(F_{m.n}\varepsilon + a_0K);$$

$$K_4 = c_{c.э}F_{m.n}\varepsilon + (a_0c_{c.э} - b_1 + b_0)K;$$

$$K_5 = a_1K.$$

Тогда уравнение (3.29) примет вид:

$$(K_2t^2 + K_3t + K_4)dt - K_5T_{cm.a.}(t)dt = K_1dT_{cm.a.} \quad (3.30)$$

Итак, для определения температуры стенок аккумулятора $T_{cm.a.}(t) = T(t)$ требуется решить задачу Коши:

$$\begin{cases} (K_2t^2 + K_3t + K_4)dt - K_5Tdt = K_1dT \\ T(0) = T_0 \end{cases}, \quad (3.31)$$

где $(K_2t^2 + K_3t + K_4)dt - K_5Tdt = K_1dT$ - дифференциальное уравнение первого порядка;

$T(0) = T_0$ - начальное условие;

T_0 - начальная температура аккумулятора, К.

Общее решение дифференциального уравнения (3.31) имеет вид:

$$T = Ce^{-\frac{K_5}{K_1}t} + \frac{K_2}{K_5}t^2 + \left(\frac{K_3}{K_5} - 2K_1\frac{K_2}{K_5^2}\right)t + \frac{K_4 - \frac{K_1}{K_5}(K_3 - 2K_1\frac{K_2}{K_5})}{K_5}. \quad (3.32)$$

Константу C , входящую в это решение, найдём из начального условия $T(0) = T_0$:

$$C = T_0 - \frac{K_4 - \frac{K_1}{K_5}(K_3 - 2K_1\frac{K_2}{K_5})}{K_5}. \quad (3.33)$$

Подставляя значение константы C из (3.33) в (3.32), окончательно получим:

$$T = T_{m.n}(t) = (T_0 - T_*)e^{-\lambda t} + at^2 + bt + T_*, \quad (3.34)$$

$$\text{где } T_* = \frac{K_4 - \frac{K_1}{K_5}(K_3 - 2K_1\frac{K_2}{K_5})}{K_5}; \quad \lambda = \frac{K_5}{K_1}; \quad a = \frac{K_2}{K_5}; \quad b = \left(\frac{K_3}{K_5} - 2K_1\frac{K_2}{K_5^2}\right).$$

Получив искомое выражение (3.34), можно далее определить температуру воды в аккумуляторе и температуру сушильного агента на входе в сушильную камеру.

Температуру нагрева зерна определим из следующих соображений с учетом [67]. Пусть m - масса зерна, кг; c_3 - удельная теплоёмкость зерна, Дж/(кг·°С); T_0 - начальная температура зерна, °С; $T = T(t)$ - температура зерна в момент времени t ($t \geq 0$).

Тогда $Q = c_3 m T(t) = c_3 m T$ - величина аккумулированной зерном теплоты в момент времени t , а $Q_0 = c_3 m T_0$ - в момент времени $t = 0$.

За время dt количество теплоты, аккумулированной зерном, увеличится на величину

$$dQ = c_3 m dT(t). \quad (3.35)$$

Это количество теплоты будет передано зерну сушильным агентом, имеющим постоянную температуру, в процессе их теплообмена, т.е.:

$$dQ = k(T_1 - T_3)dt, \quad (3.36)$$

где k - коэффициент теплообмена.

$$c_3 m dT = k(T_1 - T_3)dt. \quad (3.37)$$

Произведем разделение переменных:

$$\frac{dT}{T_1 - T_3} = \frac{k}{c_3 m} dt.$$

Проинтегрируем полученное выражение:

$$\int \frac{dT}{T_1 - T_3} = \frac{k}{c_3 m} \int dt, \quad \int \frac{dT}{T_1 - T_3} = \frac{k}{c_3 m} t + A, \quad (3.38)$$

где A – произвольная константа интегрирования.

Для вычисления интеграла в левой части выражения (3.38), сделаем подстановку:

$$T_1 - T_3 = x. \quad (3.39)$$

Тогда

$$d[T_1 - T_3] = dx; \quad dT_3 = -dx. \quad (3.40)$$

С учетом выражения (3.39, 3.40) и наличия постоянной интегрирования A в правой части выражения (3.38) левая часть равенства (3.38) после интегрирования примет вид:

$$\int -\frac{dx}{x} = -\ln x. \quad (3.41)$$

Заменим левую часть равенства (3.38) с учетом выражения (3.40):

$$-\ln x = \frac{k}{c_3 m} t + A.$$

Полученное равенство после преобразований с учетом выражения (3.38) будет иметь вид:

$$T = T_1 - C e^{-\frac{k}{c_3 m} t}. \quad (3.42)$$

Учитывая начальное условие $T(0) = T_0$, из выражения (3.42) получим:

$$C = T_1 - T_0.$$

Введем обозначение:

$$\lambda = \frac{k}{c_3 m}.$$

Тогда равенство (3.42) примет окончательный вид:

$$T = T_1 - (T_1 - T_0) e^{-\lambda t}. \quad (3.43)$$

Графически поведение функции $T = T(t)$ изображено на рисунке 3.6.

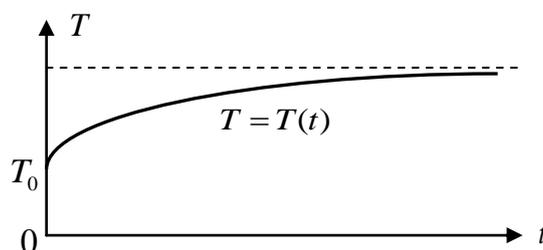


Рисунок 3.6 – График изменения температуры нагрева объекта теплового воздействия в гелиоустановках

Выражение (3.43) позволяет определить температуру нагрева объекта теплового воздействия в гелиоустановке с учетом внешних факторов окружающей среды и теплотехнических характеристик самого объекта. Из анализа полученной зависимости видно, что в основном температура нагрева объекта теплового воздействия определяется его массой и теплоемкостью, начальной температурой, коэффициентом теплообмена, продолжительностью нагрева. При этом возможно решение двух задач. Первая: задаваясь предельной температурой нагрева объекта, определяем максимальную продолжительность его тепловой обработки в заданных условиях. Вторая: задаваясь максимальным временем тепловой обработки объекта, определяем возможную температуру его нагрева.

Полученная математическая зависимость удобна для практических расчетов, требует не большой объем исходной информации справочного и экспериментального характера.

Так как в результате использования систем электроподогрева и активной вентиляции скорость сушки во втором периоде, начиная с определенного момента времени, увеличивается до максимума, то выражение времени сушки (2.89) представим в виде

$$\tau_{\text{суш}} = \tau_1 + \tau_2 = \frac{1}{N_{k.n} + \Delta N} \left[\omega_{\text{з.н}} - \omega_{k.n} + 2,3 \cdot (\omega_{k.n} - \omega_p) \cdot \lg \frac{\omega_{k.n} - \omega_p}{\omega_{\text{з.н}} - \omega_p} \right], \quad (3.50)$$

где $N_{k.n}$ – скорость сушки в начале первого периода, %/ч;

ΔN – приращение скорости сушки в конце первого периода за счет работы систем электроподогрева и активной вентиляции, %/ч.

Значения коэффициентов $N_{k.n}$, ΔN и влажности $\omega_{k.n}$ определяются на основании результатов экспериментальных исследований.

Глава 4 Методика экспериментальных исследований барабанной гелиосушки зерна

Целью экспериментальных исследований является установление функциональных зависимостей между физическими параметрами окружающей среды, теплофизическими параметрам высушиваемого материала и конструктивно-технологическими параметрами барабанной гелиосушки зерна с целью обеспечения высокого качества сушки семян при минимальных затратах энергии на процесс.

При определении оптимальных режимов работы установки исследуется влияние на процесс сушки следующих факторов:

- солнечной активности;
- температуры окружающей среды;
- влагосодержания атмосферного воздуха;
- температуры сушильного агента;
- расхода сушильного агента;
- исходной влажности зерна;
- площади нижнего солнечного коллектора;
- площади верхнего солнечного коллектора;
- наличия гравийного аккумулятора;
- организации движения воздуха в гелиосушке.

Перечисленные факторы являются входными.

Выходными параметрами являются время сушки и качество высушиваемого материала.

Классификация определяемых параметров гелиосушки с гравийным аккумулятором теплоты и без систем вентиляции и электроподогрева сушильного агента приведена на рис. 4.1.

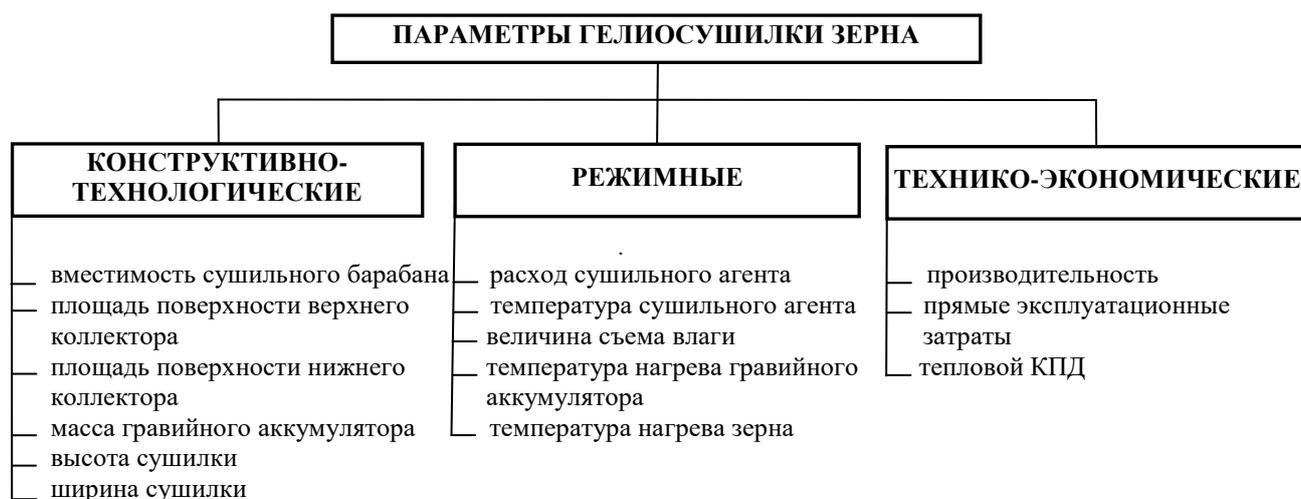


Рисунок 4.1 - Классификация параметров гелиосушки зерна с гравийным аккумулятором теплоты

Классификация параметров гелиосушилки с водяным аккумулятором теплоты и резервными системами вентиляции и электроподогрева сушильного агента представлена на рис. 4.2.



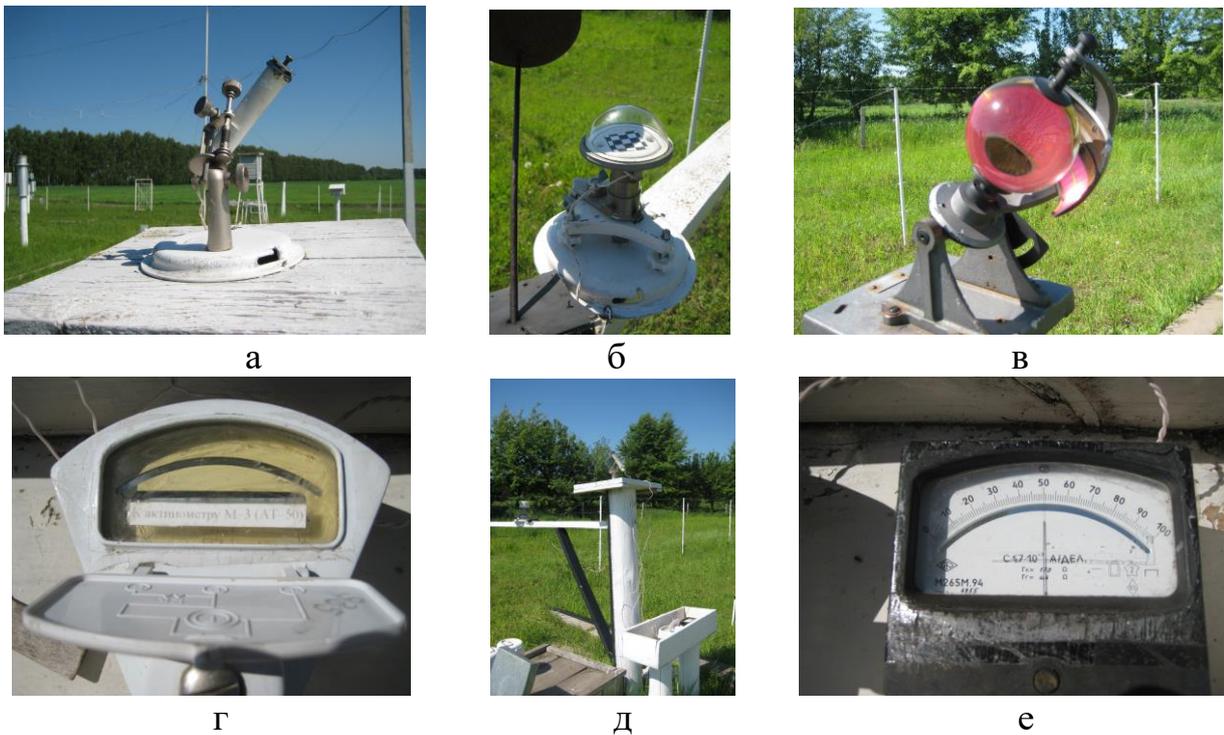
Рисунок 4.2 - Классификация параметров гелиосушилки с водяным аккумулятором теплоты и резервными системами вентиляции и электроподогрева сушильного агента

Оценивали влияние следующих входных факторов на процесс сушки:

- солнечной активности;
- температуры окружающей среды;
- расхода сушильного агента;
- температуры сушильного агента;
- наличия водяного аккумулятора теплоты;
- использования системы подогрева сушильного агента;
- использования системы активной вентиляции.

В процессе исследований с помощью метеорологических приборов измеряются такие параметры окружающей среды, как энергетическая освещенность, прямая, рассеянная и суммарная солнечная радиация, продолжительность солнечного сияния (рис. 4.3).

Также при проведении экспериментальных исследований измерялись параметры сушиллки, высушиваемого материала с помощью восьмиканального измерителя-регулятора температуры ТРМ 138 с ежечасной фиксацией показаний на ЭВМ, прибора для определения скорости ветра и расхода воздуха (термоанемометр) testo 405, прибора для измерения влажности воздуха и температуры (термогигрометр) testo 625 фирмы «Testo AG» (Германия), метеометра МЭС-200; восьми датчиков термосопротивления ДТС 015-50М.В3.500 (рис. 4.4).



а - термоэлектрический актинометр М-3 (АТ-50); б - термоэлектрический пирометр М-80М; в - гелиограф универсальный ГУ-1; г, е - люксметр Ю-16; д - вид метеорологических приборов для измерения солнечной радиации.

Рисунок 4.3 - Метеорологические приборы



а - датчик термосопротивления ДТС 015-50М.В3.500; б - восьмиканальный измеритель-регулятор температуры ТРМ 138; в - фиксация показаний 8 датчиков на ЭВМ с построением графика; г - термоанемометр testo 405; д - метеометр МЭС-200; е - термогигрометр testo 625

Рисунок 4.4 - Измерительное оборудование

В качестве сушильного барабана использовался триер, в котором были просверлены отверстия диаметром 3,2 мм (рис. 4.5).

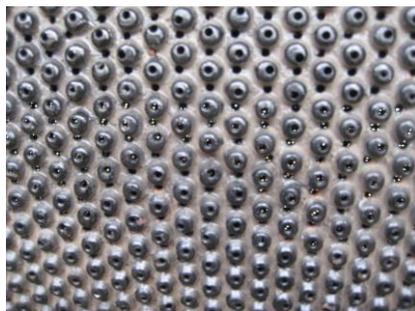


Рисунок 4.5 - Фрагмент поверхности сушильного барабана

Схема отбора проб для замера влажности и температуры зерна в сушильном барабане представлена на (рис. 4.6).

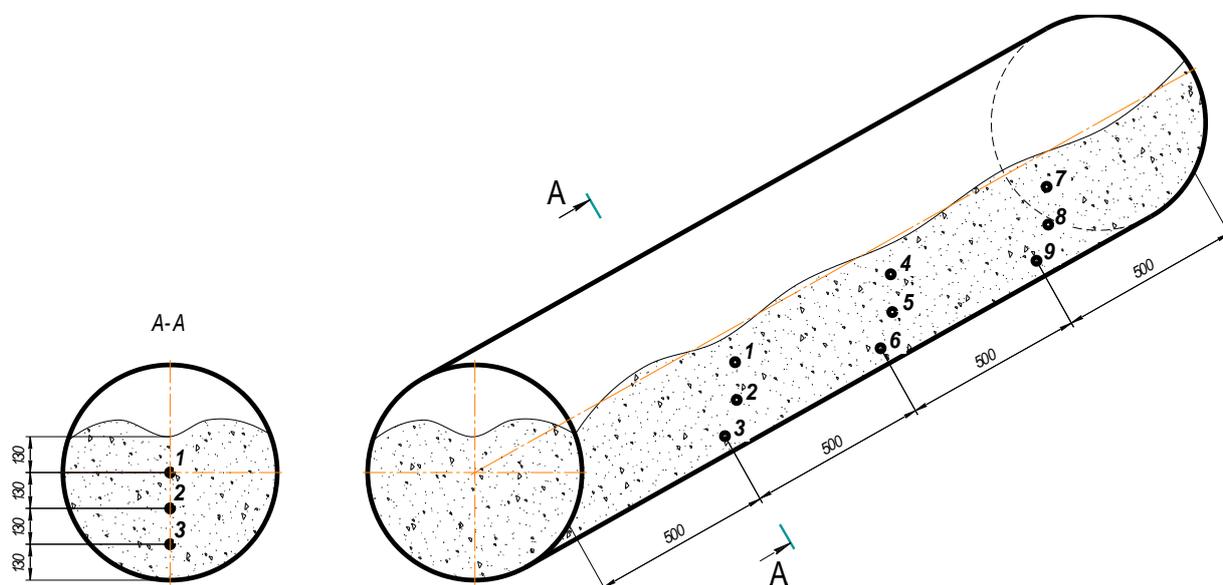


Рисунок 4.6 - Схема точек замеров при исследовании технологического процесса сушки зерновой массы: по длине L и высоте h сушильного барабана

Влажность зерна определяли с помощью микропроцессорного влагомера Wile-65 (рис. 4.7). Диапазон измерения составляет от 8 до 35% с погрешностью 0,1%.

Из всех теплофизических и массообменных свойств наибольшее значение при хранении зерновой массы имеют теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность и термовлагопроводность.

Теплопроводность характеризует теплопроводящую способность зерна, имеющего коэффициент теплопроводности λ в пределах от 0,13 до 0,2 Вт/(м·К), что является довольно низкой теплопроводностью. Так, например, у железа ко-

эффицент равен 44...68 Вт/(м·К). Основные компоненты зерновой массы (зерно, семена и воздух), обуславливающие ее теплопроводность, – плохие проводники теплоты. Теплопроводность зерновой массы повышается при увеличении ее влажности.



Рисунок 4.7 - Влагомер зерна Wile-65 компании «Farmcomp Agroelektronics»

Температуропроводность показывает скорость изменения температуры в зерне, характеризует его тепловую инерцию. Коэффициент температуропроводности зерновой массы колеблется в пределах $1,7 \cdot 10^{-7} \dots 1,9 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$. Он несколько больше коэффициента температуропроводности воды, который при температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$ равен $1,4 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$. Зерновая масса обладает большой тепловой инерцией, но значительно меньшей, чем хорошие проводники теплоты.

Во время длительного хранения распространение температурной волны в зерновой массе происходит медленно. С наступлением теплых дней весной и летом охлажденные массы зерна прогреваются крайне медленно. В этом и состоит положительное значение низких величин тепло- и температуропроводности зерновой массы, которые позволяют сохранять в ней небольшую температуру даже в теплое время года, замедляя тем самым все физиологические процессы на длительное время. Вместе с тем, вследствие низкой теплопроводности, значительная доля теплоты, выделяемой при дыхании живых организмов зерновой массы, концентрируется в очаге тепловыделения, вызывая в нем быстрое повышение температуры. Так возникает самосогревание зерна, опасное своими последствиями.

Большое значение для процесса хранения и сушки зерна имеет явление термовлагопроводности - перемещения влаги от слоев более нагретых к менее нагретым в зерновой массе под воздействием перепада температур в ее насыпи. Термовлагопроводности способствуют воздействию сушильного агента, перепады температур в насыпи, например в осенне-зимний и весенне-летний периоды, неравномерный обогрев стен хранилищ и т.д.

Глава 5 Результаты экспериментальных исследований

5.1 Характеристика климатических условий экспериментальных исследований

Характеристика климатических условий получена по итогам обзора погодного мониторинга (агрометеорологический бюллетень) метеорологической станции 1 разряда по декадам месяца (лицензия метеорологической станции Брянской ГСХА серии Б номер 420885).

Наблюдения проведены за все декады августа и сентября 2009-2011 годах. Географические координаты расположения метеостанции и испытуемой гелиосушки: $53^{\circ}26'$ СШ и $34^{\circ}07'$ ВД (по Гринвичу), высота над уровнем Балтийского моря 187,98 м.

Суммарная солнечная радиация за сутки в августе и сентябре 2009-2011 годах был следующая (рис. 5.1-5.2).

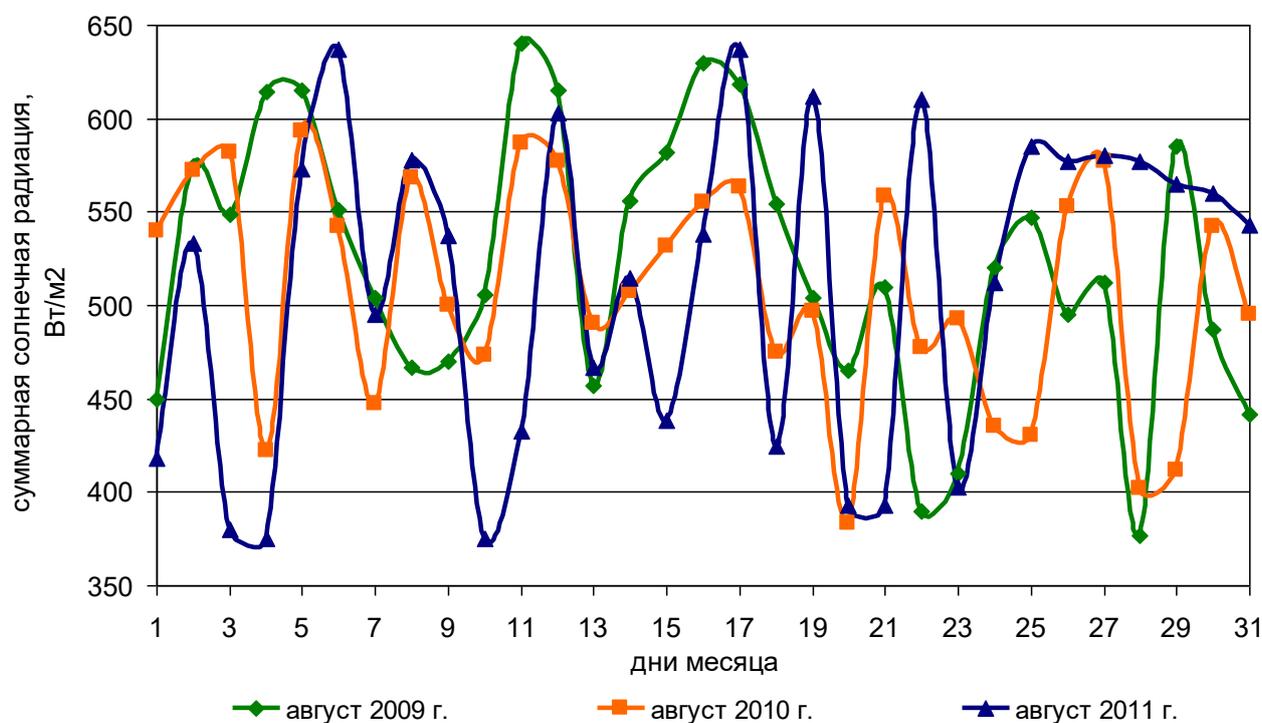


Рисунок 5.1 - Максимальная дневная суммарная солнечная радиация в августе месяце на наклонную поверхность 2009-2011 г.г.

Суммарная солнечная радиация изменялась в зависимости от облачности и влажности атмосферных фронтов и выражена в $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Ниже приведены основные показатели агрометеорологического мониторинга опытного поля университета и прилегающей территории (Учхоз Брянского ГАУ), измерения которых проводилось в испытуемый период 2009 года.

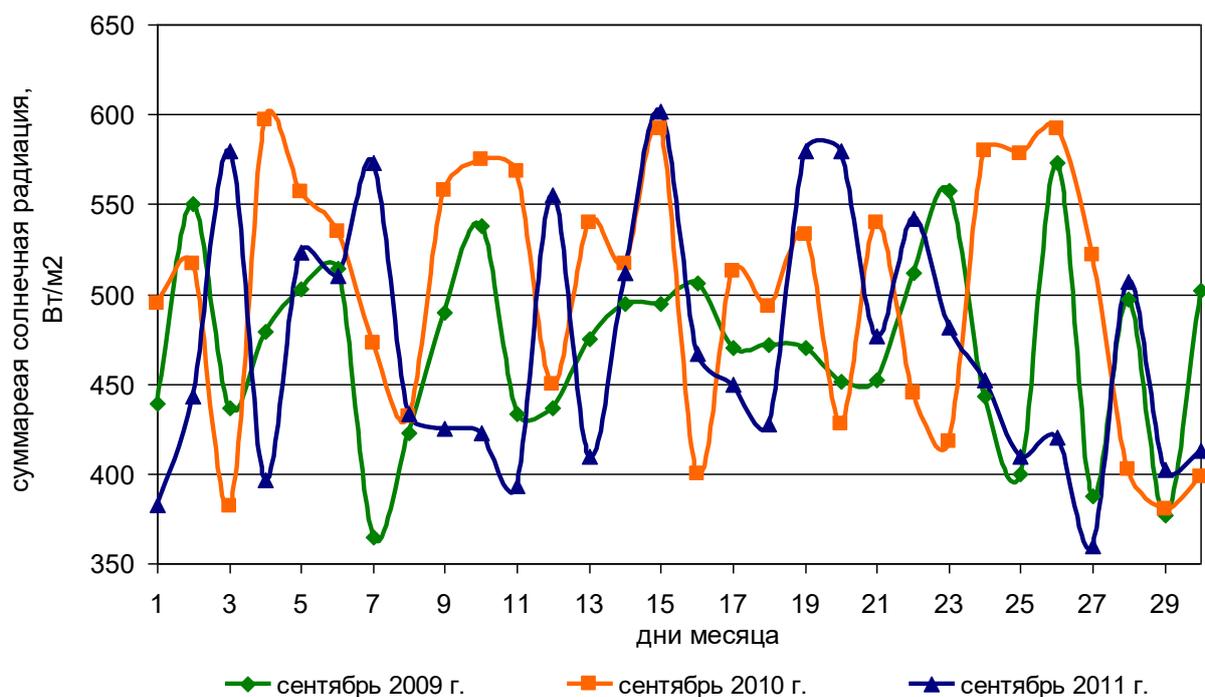


Рисунок 5.2 - Максимальная дневная суммарная солнечная радиация в сентябре месяце на наклонную поверхность 2009-2011 г.г.

Температура воздуха в первой декаде августа была выше нормы, а вторая и третья декады по этим показателям были близки к норме. Среднесуточная температура за месяц составила $+16,5^{\circ}\text{C}$ при месячной норме $+17,0^{\circ}\text{C}$. Эффективных температур отмечено $118,3^{\circ}\text{C}$, активных $169,9^{\circ}\text{C}$.

Атмосферные осадки были в первой декаде выше нормы. Дождя выпало $60,3\text{ мм}$, что составило $94,2\%$ от месячной нормы. Атмосферные осадки во второй и в третьей декадах были ниже нормы. Во второй декаде осадков в виде дождя выпало $11,2\text{ мм}$, что составило $17,5\%$ от месячной нормы, а в третьей осадков выпало $6,6\text{ мм}$, что составило $10,3\%$ от месячной нормы, равной 64 мм за месяц. Норма 1 декады 26 ; 2-22; 3-16 мм). Было 15 дней с осадками при норме за август 10,5 дней.

Характеристика водяного пара в атмосфере зависит от насыщенности влагой атмосферных фронтов и их температуры. Средняя влажность воздуха не превышала 75% , при среднемесячной норме 76% . Абсолютная влажность воздуха за август $15,1\text{ мг/м}^3$. С влажностью воздуха коррелировали другие параметры: в начале первой декады 1 августа в 3 часа упругость водяного пара $E_{\text{мб}}$ была $17,8\text{ мб}$, дефицит упругости $d_{\text{мб}}$ - $1,2\text{ мб}$, точка росы t_d - $+15,7^{\circ}\text{C}$. В конце первой декады 10 августа соответственно $10,6$ и $0,3\text{ мб}$; $+7,8^{\circ}\text{C}$. В начале второй декады 11 августа упругость водяного пара $E_{\text{мб}}$ была $11,5\text{ мб}$, дефицит упругости $d_{\text{мб}}$ - $0,6\text{ мб}$, точка росы t_d - $+9,0^{\circ}\text{C}$. В конце второй декады 20 августа соответственно $12,6$ и $1,4\text{ мб}$; $+10,4^{\circ}\text{C}$. В начале третьей декады 21 августа упругость водяного пара $E_{\text{мб}}$ была $10,7\text{ мб}$, дефицит упругости $d_{\text{мб}}$ - $1,2\text{ мб}$, точка росы t_d - $+8,0^{\circ}\text{C}$. В конце третьей декады 31 августа соответственно $13,1$ и $1,6\text{ мб}$; $+11,0^{\circ}\text{C}$. Преобладали облака, характерные для летних месяцев: Sc, St, Ac

(слоисто-кучевые, слоистые, высококучевые). Освещенность по люксметру Ю-116 колебалась от 10,15 тыс. лк. до 80,26 тыс. лк. Видимость варьировала от 70-80 до 710 -790 м.

Адекватно влажности воздуха и диффузии в атмосферных фронтах изменялось давление. Среднее атмосферное давление за первую декаду 100,1 кПа (753 мм рт. ст.), среднее за вторую декаду 99,8 кПа (750 мм рт. ст.), а за третью декаду 100,0 кПа (752 мм рт. ст.). Среднее атмосферное давление за месяц составляет 99,9 кПа (752 мм рт.ст.) Условно нормальным считается давление 100 кПа (750 мм рт.ст.).

Согласно давлению и турбулентности воздуха в атмосферных фронтах изменялась скорость ветра и его направление (по флюгеру Вильда с легкой доской ФВЛ) у поверхности земли. Средняя за первую декаду 1,0 м/с, за вторую декаду 2,1 м/с и за третью декаду 1,1 м/с при месячной норме 4,1 м/с. Максимальный порыв скорости ветра 12 м/с зафиксирован в 18 час. 14 августа. Преобладали ветры направлений СЗ, ЮЗ, ЮВ, СВ.

Солнечное сияние изменялось в зависимости от влажности и облачности атмосферных фронтов. В виду малооблачной погоды сияние в первой и второй декадах было выше нормы и составило соответственно 88 час. 24 мин. и 95 час. 22 мин., в третьей декаде сияние было ниже нормы в виду облачной погоды и составило 63 час. 10 мин.

Август месяц был теплым. Теплообеспеченность сельскохозяйственных культур была ниже месячной нормы на 1,6 °С. Максимальная температура воздуха поднималась +20,3 °С. Приход ФАР оставался на уровне средних значений. Атмосферные осадки были в виде дождя. Осадков выпало 39,6% от месячной нормы.

Температура воздуха в сентябре была выше нормы. Среднесуточная температура за месяц составила +14,6 °С при месячной норме +11,4 °С. Эффективных температур отмечено в первой декаде 122,5 °С, во второй 101,1 °С, в третьей 65,1 °С, активных соответственно 172,5 °С, 151,1 °С и 90,1 °С.

Атмосферные осадки были в трех декадах месяца выше нормы. Всего за исследуемый период выпало 38,8 мм осадков в виде дождя и составило в первой декаде 35,4%, во второй 27,4% и в третьей декаде 21,5% от месячной нормы, равной 46 мм. (Норма 1 декады 16; 2-15; 3-15 мм). Было 10 дней с осадками при норме за сентябрь 8,2 дня.

Средняя влажность воздуха составила 81%, при среднемесечной норме 80%. Абсолютная влажность воздуха за сентябрь не превышало 11,7 мг/м³. Упругость водяного пара в начале первой декады 1 сентября в 3 часа Емб была 14,0 мб, дефицит упругости дмб - 0,5 мб, точка росы t_d - +12,0 °С. В конце первой декады 10 сентября соответственно 16,0 и 2,2 мб; +14,0 °С. В начале второй декады 11 сентября упругость водяного пара, дефицит упругости и точка росы находились в следующих значениях соответственно 15,4 и 3,5 мб; +13,4 °С. В конце второй декады 20 сентября эти значения снизились до следующих пределов 12,6 и 0,3 мб; +10,4 °С. В начале третьей декады 21 сентября соответственно 11,8 и 0,8 мб, точка росы t_d - +9,4 °С. В конце третьей декады 30 сентября 7,7 и 3,9 мб; +3,2 °С. Преобладали облака, характерные для летних месяцев. Осве-

щенность по люксметру Ю-116 колебалась от 10,1 тыс. лк. до 71,3 тыс. лк. Видимость варьировала от 70-90 до 590 -610 м.

Атмосферное давление за сентябрь в среднем было 100,1 кПа (753 мм рт. ст.), скорость ветра 1,7 м/с при месячной норме 4,4 м/с. Максимальный порыв скорости ветра 12 м/с зафиксирован в 15 час. 3 сентября и в 15 час. 23 сентября. Преобладали ветры направлений СЗ, ЮЗ, СВ.

Сентябрь месяц был теплым, но дождливым. Атмосферные осадки были в виде дождя и составили 84,3% от месячной нормы. Теплообеспеченность сельскохозяйственных культур была выше месячной нормы на 1,8 °С. Максимальная температура воздуха поднималась до +18,7 °С. Солнечное сияние было выше нормы и составило за месяц 176 час. 14 мин.

Ежегодно солнечные лучи приносят на Землю энергию, эквивалентную сжиганию 50 трлн. т топлива. Плотность потока солнечной энергии на земной поверхности, с учетом суточно-годовых колебаний и облачности, составляет в среднем 600...650 Вт/м² [19].

5.2 Характеристика зерновой массы как объекта сушки

Как известно, в свежееубранном зерне продолжается процесс послеуборочного дозревания. У влажного зерна усиливается дыхание, а выделяющаяся при этом вода повышает общий процент влажности зерновой массы. Процесс дыхания протекает очень интенсивно. Интенсивность дыхания пропорциональна повышению влажности зерна. Во влажном зерне быстро размножаются хлебные вредители (клещ, долгоносик и др.), которые разрушают зерна и ускоряют процесс самосогревания [69, 84, 92, 94, 112, 136].

Материалом исследования, проведенного с целью изучения кинетики сушки зерна, являлась пшеница продовольственного назначения. Испытания были проведены на базе учебной научно-производственной машинно-технологической опытно-испытательной станции Брянского ГАУ исследования в Брянском филиале ФГУ «Госсорткомиссия» и центральной учебно-научной испытательной лаборатории Брянского ГАУ для партий зерна.

При проведении экспериментальных исследований использовалось зерно пшеницы сортов Дарья, Злата, Ирень с нормальной клейковиной. Определялись и контролировались основные физико-механические свойства, засоренность и качественные показатели зерна (табл. 5.1).

Насыпная плотность зерна пшеницы зависит от влажности и колеблется в пределах, от 650 до 850 кг/м³. Помимо влажности на насыпную плотность влияние оказывает и анатомическое строение зерна.

Исследуемое зерно имело начальную влажность свыше 18,0% и температуру зерна 20 °С. Масса 1000 зерен у сорта Дарья составляло 68,1 г, Злата - 70,7 г и Ирень - 74,3 г. При увеличении влажности и засоренности снижается сыпучесть зерновой массы, а угол естественного откоса увеличивается. Угол естественного откоса соответственно 27°, 30° и 35°, угол трения по дереву 20°, 22° и 25°, по стали - 20°.

Таблица 5.1 - Состояние влажности семян различных культур

Культура	Относительная влажность зерна, %			
	сухое	средней сухости	влажное	сырое
Зерновые: - пшеница, рожь, ячмень - овес, кукуруза (зерно)	до 14 ...14	14...15,5 14...16	15,7...17 16...18	свыше 17 ...18
Зерновые бобовые: - горох, соя, люпин - фасоль	...14 ...16	14...16 16...18	16...18 18...20	...18 ...20

Коэффициент внешнего трения зависит от влажности и скорости скольжения. Так при влажности 20...25% коэффициент трения зерна пшеницы по стали (необработанной) составляет 0,43...0,45 [21, 49, 59, 83, 107, 125]. Увеличение влажности зерна приводит к увеличению коэффициента внешнего трения.

Коэффициент внутреннего трения определяется аналогично коэффициенту внешнего трения и также зависит от влажности (табл. 5.2).

Таблица 5.2 - Угол естественного откоса и трения для семян различных культур

Культура	Угол естественного откоса, град.	Угол трения, град.	
		по дереву	по стали
пшеница	23...38	20...25	20
рожь	23...38	20	20
ячмень	28...40	20...25	20
овес	31...44	15...25	18...36
просо	20...25	11	11
горох	22...28	2...14	2...15
кукуруза	30...40	15...35	20
подсолнечник	31...45	20...30	15...25

Физико-механические свойства и качественные показатели зерна могут значительно изменяться в зависимости от различных факторов: влажности, продолжительности и способа хранения, наличия посторонних примесей и т.д.

Экспериментальные исследования проводились на зерне с различными качественными показателями и различной степенью засоренности, взятом непосредственно из производственных условий.

Для подтверждения работоспособности сушилки при работе с засоренным зерном проводилась серия поисковых опытов по сушке зерна с повышенной степенью засоренности. При сушке партий засоренного зерна не наблюдалось значительного увеличения конечной влажности, засоренного зерна по

сравнению с чистым зерном. Увеличение температуры засоренного зерна относительно чистого на выходе из зоны сушки также было незначительным. Небольшие расхождения по температуре нагрева зерна после сушки и конечной влажности между засоренным и чистым зерном свидетельствуют о том, что сушка происходит при интенсивном перемешивании зерна. Зерновая масса в процессе сушки равномерно прогревается и отдает влагу теплоносителю.

На основании проведенных опытов по сушке засоренного зерна можно сделать вывод, что разработанная барабанная зерносушилка может эффективно использоваться для сушки зерна любой степени засоренности.

Рассмотренные физико-механические свойства зерна пшеницы являлись одними из основных при выборе параметров зерносушилки и конструкции сушильного барабана. Данные о физико-механических свойствах зерна пшеницы использованной в ходе исследований, представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 - Показатели качества пшеницы

Наименование показателя	Стандартные	Фактические
натура, г/л	750	745...767
клейковина, %	не ниже 2 группы	70...75 - 1 группа
качество клейковины, усл. ед.	25	22...25
сорная примесь, %	не более 2	1,3
зерновая примесь, %	не более 5	2,8
стекловидность, %	50...60 мягкая пшеница	38...44
количество проросших зерен, %	не более 3	0,8
засоренность вредителями	не допускается, кроме зараженности клещами не выше второй степени	встречается зараженность клещами первой степени

Пшеница одна из наиболее распространенных зерновых культур. Она является одной из древнейших злаковых культур, возделываемых человеком. Ценность зерна пшеницы заключается в том, что оно способно образовывать клейковину, имеющую большое значение для выпечки хлеба, изготовления макарон, манной крупы и других хлебных изделий.

Пшеничная мука дает хлеб лучшего качества, более вкусный и полнее усваиваемый, чем мука из зерна других культур (ржи, ячменя, овса, кукурузы). Пшеничное зерно и продукты его переработки имеют также диетическое и лечебное значение.

Однако в отличие от сушки других влажных материалов, сушка зерна характеризуется одной очень важной особенностью: зерно - это живой организм, и в процессе сушки его жизнеспособность должна быть полностью сохранена. Поэтому в процессе послеуборочной обработки, правильно организованная сушка, как технологический процесс, занимает важное место, так как от параметров сушильных установок и процесса сушки зависит увеличение стойкости

зерна при хранении, ускорение послеуборочного дозревания, выравниванию влажности и степени зрелости зерновой массы, улучшение технологических и семенных достоинств зерна.

5.3 Описание экспериментальной барабанной гелиосушилки зерна

На базе учебной научно-производственной машинно-технологической опытно-испытательной станции (УНПМТОИС) Брянского ГАУ была создана и испытана барабанная гелиосушилка зерна (рис. 5.3)



Рисунок 5.3 - Барабанная гелиосушилка зерна

Гелиосушилка состоит (рис. 5.4) из входного коллектора с двойным прозрачным покрытием 1, гравийного аккумулятора тепла 2 с объёмом 0,5...0,75 м³ на 1 м² площади коллектора. Аккумулятор тепла имеет перегородку 3, которая служит для организации прохода воздуха через гравий. Верхний зачерненный слой гравия служит тепловоспринимающей поверхностью. Для усиления тяги установлен дефлектор 4 вытяжной трубы, представляющей собой вертикальный солнечный коллектор, образованный двойным прозрачным покрытием 5 и задней тепловоспринимающей стенкой 6. В сушильной камере имеются резиновые фартуки 7 и 8 для организации потока нагретого воздуха. Барабан 9 установлен в опорах и имеет крышки для загрузки - выгрузки зерна. В барабане имеются лопатки 10, с помощью которых происходит перемешивание зерна. Для загрузки барабана сушильная камера имеет открывающиеся крышки 11 и 12. Барабан приводится во вращение двигателем через редуктор (рис. 5.5). От коллектора камера отделена сеткой 13.

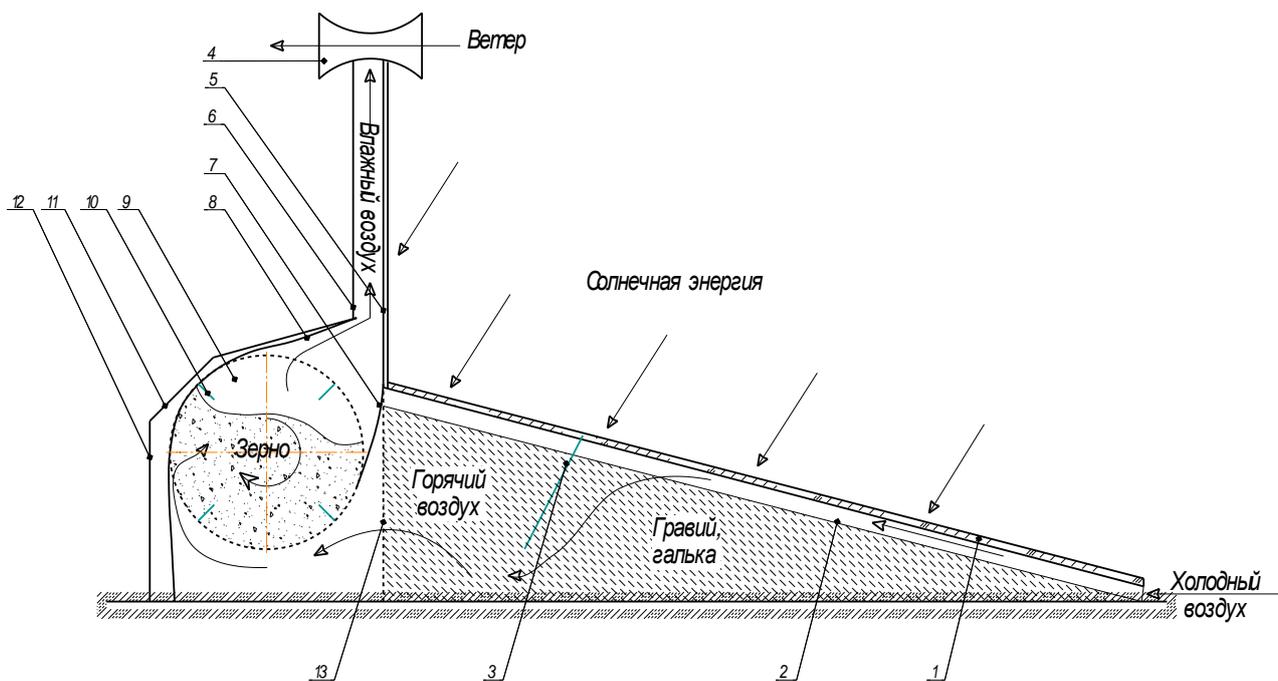


Рисунок 5.4 - Схема гелиосушилки



Рисунок 5.5 - Привод барабана

Гелиосушилка работает следующим образом. Барабан (рис. 5.6) заполняется зерном на $\frac{3}{4}$ своего объёма.



Рисунок 5.6 - Барабан с семенами зернобобовых культур

Воздух поступает в сушильную камеру, проходя через зазор между прозрачным покрытием входного коллектора и поверхностью гравия, огибая перегородку и подогреваясь. Избыток тепла воспринимает гравий (рис. 5.7).



Рисунок 5.7 - Вид гравийного аккумулятора со стороны сушильной камеры

В камеру воздух входит через сетку 13. Фартуки 7 и 8 скользят по поверхности барабана и организуют поток воздуха так, как указано на рис. 5.5 снизу барабана через него и затем вверх в вытяжной коллектор, подогревается и устремляется вверх, образуя тягу. При наличии ветра тяга усиливается дефлектором, который также препятствует попаданию воды в сушильную камеру во время дождя. При отсутствии солнца сушилка некоторое время работает за счет тепла, накопленного в гравийном аккумуляторе.

Время сушки зависит от влажности зерна и солнечной активности. В яр-

кий солнечный летний день 1 м² коллектора может дать до 0,7 кВт тепловой мощности в условиях Брянской области. При кратковременных летних дождях зерно в гелиосушилке укрыто от дождя, а сушка продолжается за счет тепла, накопленного в аккумуляторе. Устанавливается сушилка на асфальт, в грунт, но так, чтобы попадание воды внутрь коллектора было бы исключено, в том числе, и за счёт её поступления по причине влагопроницаемости грунта.

При работе без аккумулятора на грунт укладывается, например, зачерненный шифер волнами поперёк потока, грунт накрывается пленкой, рубероидом и т.п., в том числе и перед засыпкой гравия.

Сушилка была испытана на сушке зерновых (пшеница, рожь, ячмень) и зернобобовых культур (люпин, кормовой горох, бобы) (рис. 5.8).



Рисунок 5.8 - Измерение технологических параметров зерна

Для контроля параметров гравийного аккумулятора и сушильного агента использовались датчики термосопротивления, установленные в соответствующих местах гелиосушки (рис. 5.9).

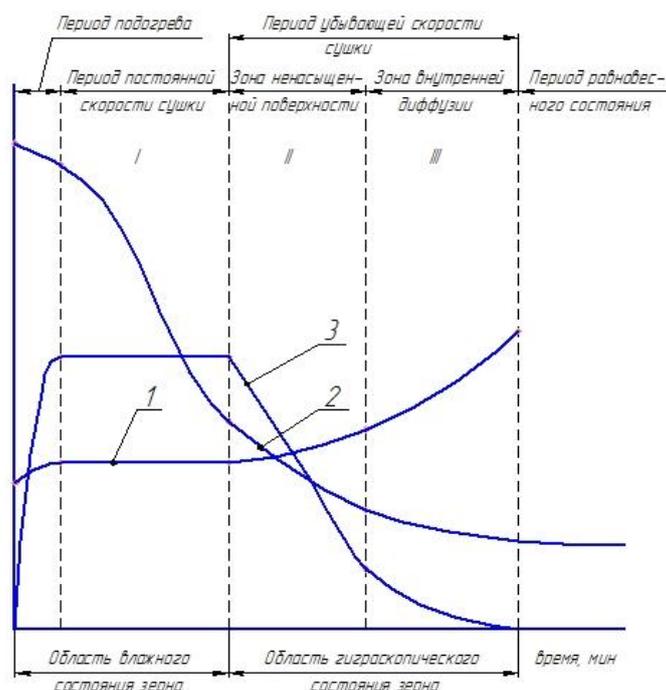


Рисунок 5.9 - Датчик термосопротивления в гравийном аккумуляторе, в сушильной камере и в верхнем коллекторе

5.4 Результаты экспериментальных исследований барабанной гелиосушки

Процесс сушки зерна характеризуется изменением влажности и температуры зерна во времени. О скорости сушки можно судить по количеству влаги, испаренной из зерна за определенный период времени (г или кг в 1 мин или 1 ч), или по снижению влажности в процентах за этот же период.

Согласно рис. 5.10 процесс сушки зерна можно разбить на три периода [43].



1-температура материала; 2 - влагосодержание материала; 3 - скорость сушки

Рисунок 5.10 - График скорости сушки и изменения температуры и влагосодержание зерна

1. Начальный период, интенсивность сушки низкая из-за пониженной температуры зерна.

2. Период максимально высокой скорости сушки (зерно прогрето). Скорость процесса определяется способностью зерна к влагоотдаче при данной температуре нагрева.

3. Период убывающей скорости сушки начинается с момента, когда приток влаги из центра зерна отстает от скорости испарения, и на поверхности зерна образуются участки, насыщенные влагой. В данном случае скорость сушки определяет уже не способность воздуха поглощать влагу, а все уменьшающуюся скорость, с которой зерно отдает влагу, в результате чего воздух уходит из сушилки ненасыщенным влагой. В заключение этапа скорость сушки зерна падает до нуля.

На рис. 5.11-5.16 представлены зависимости, которые были получены в

результате сушки зерна пшеницы при различных режимах сушки и погодных условиях в дневное и в ночное время.

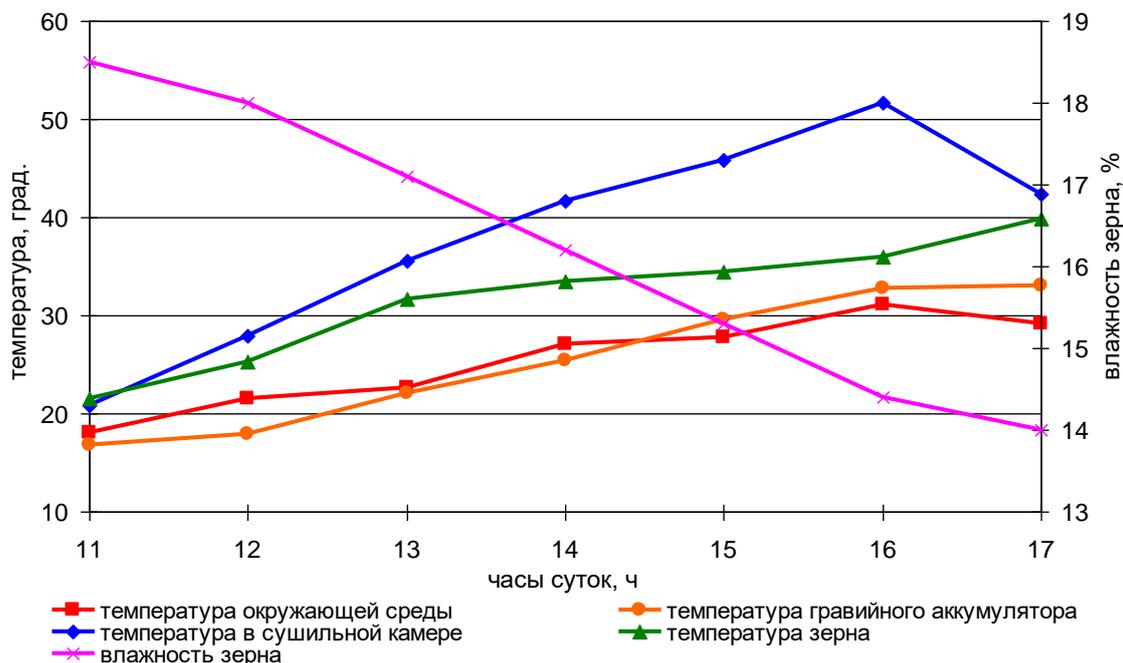


Рисунок 5.11 - Изменение температуры и влажности зерна в дневное время суток, в ясную погоду при вращении сушильного барабана

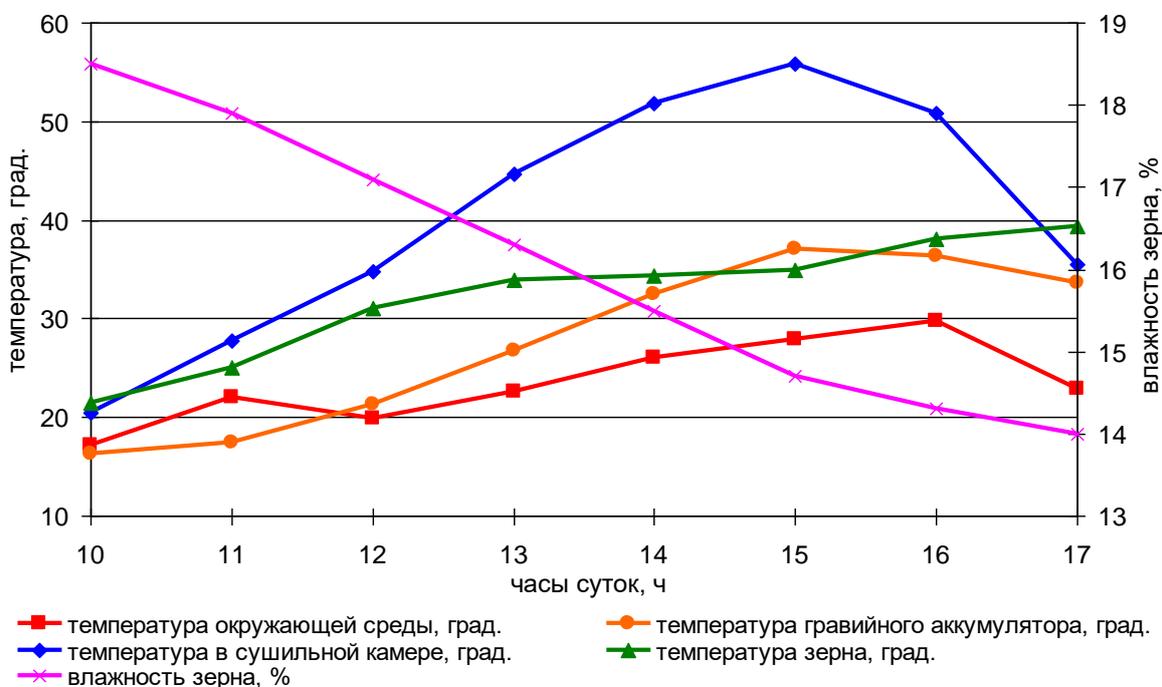


Рисунок 5.12 - Изменение температуры и влажности зерна в дневное время суток, в ясную погоду без вращения сушильного барабана

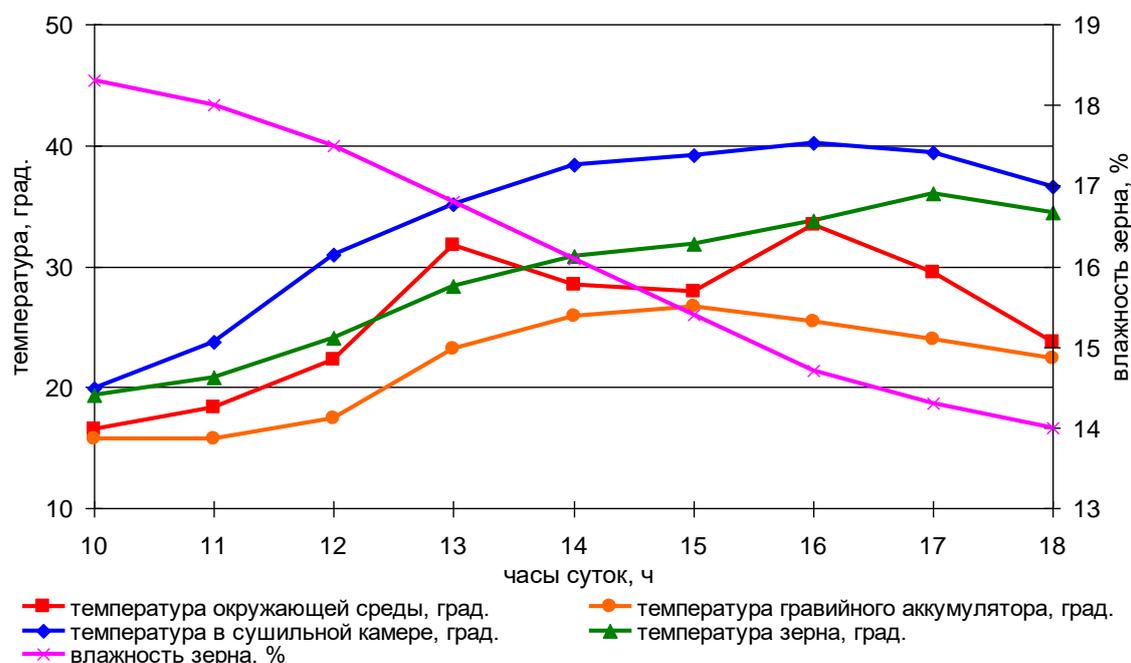


Рисунок 5.13 - Изменение температуры и влажности зерна в дневное время суток, при облачности в 4 балла (максимальная облачность 10 баллов), при вращении сушильного барабана

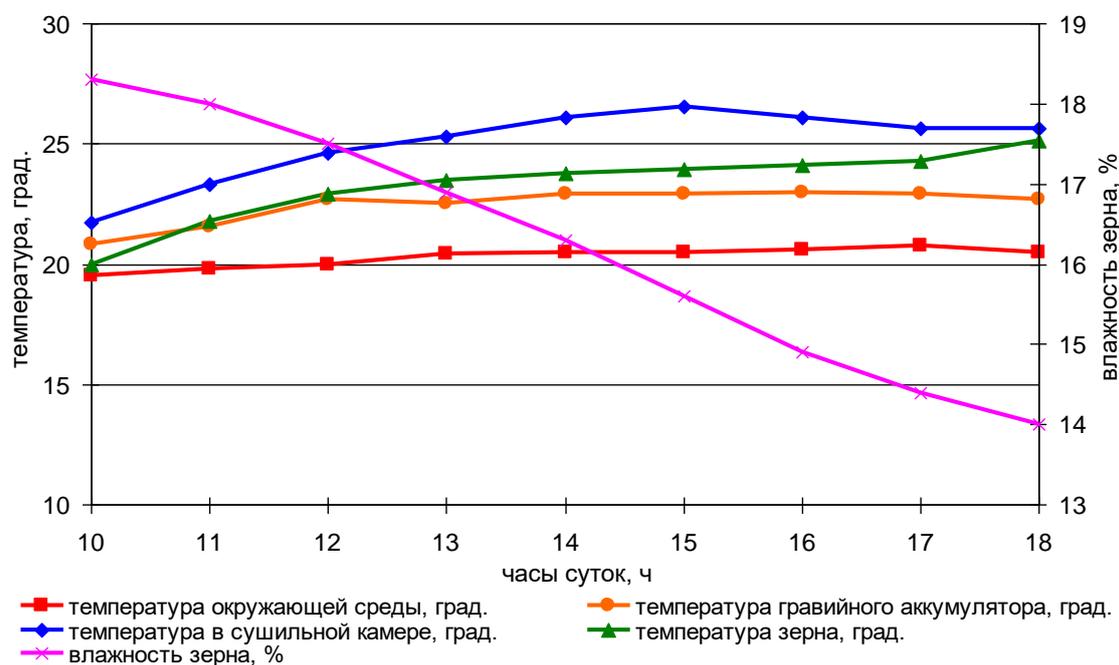


Рисунок 5.14 - Изменение температуры и влажности зерна в дневное время суток, при облачности в 8 баллов, без вращения сушильного барабана

Анализ данных (рис. 5.11-5.14) показывает, что вращение барабана способствует лучшему прогреву зерна.

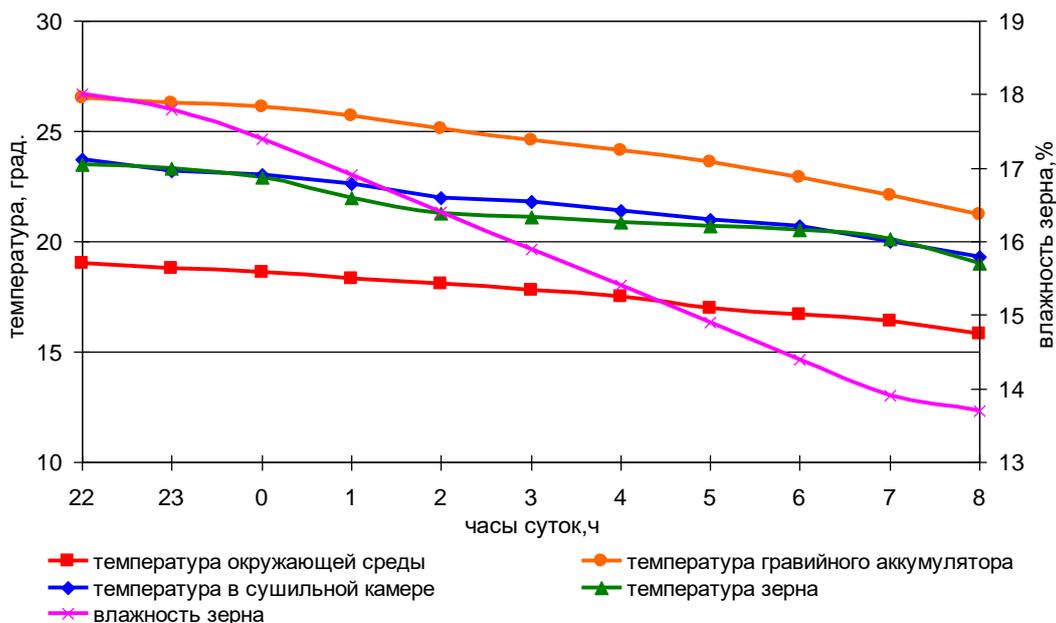


Рисунок 5.15 - Изменение температуры и влажности зерна в ночное время суток, при вращении сушильного барабана

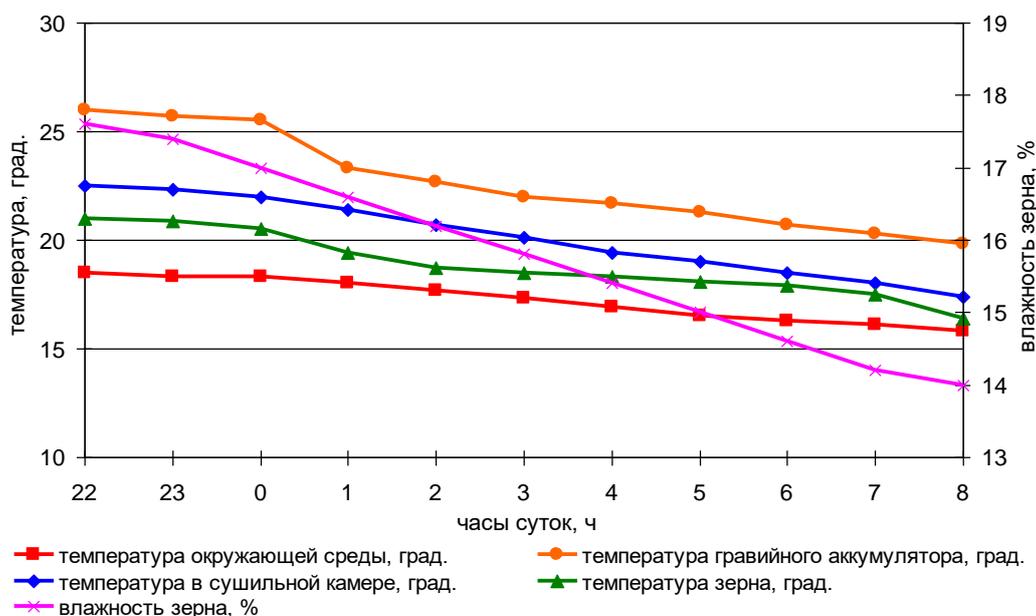


Рисунок 5.16 - Изменение температуры и влажности зерна в ночное время суток, без вращения сушильного барабана

Анализ данных (рис. 5.15-5.16) показывает, что вращение барабана обеспечивает более равномерное падение температуры гравийного аккумулятора. Это можно объяснить дополнительным гидравлическим сопротивлением барабана при его вращении, что снижает интенсивность отвода тепла.

На основании экспериментальных данных получены основные характеристики процесса сушки - кривые сушки, кривые скорости сушки и температурные кривые.

Кривая сушки характеризуют изменение влажности материала во времени (рис. 5.17-5.18).

В начале сушки испарение идет медленно (линия *AB*), так как зерно начинает интенсивно прогреваться. Продолжительность прогрева зависит от способа сушки. При увеличении температуры зерна испарение влаги интенсифицируется и далее процесс испарения идет по прямой *BC*. Точка *C* характеризует момент, когда наступает замедление процесса испарения. Влажность в точке *C* называют первой критической влажностью [54]. Линия *CD* характеризует замедление испарения влаги. В точке *D* влажность материала приближается к равновесной влажности, затем сушка прекращается.

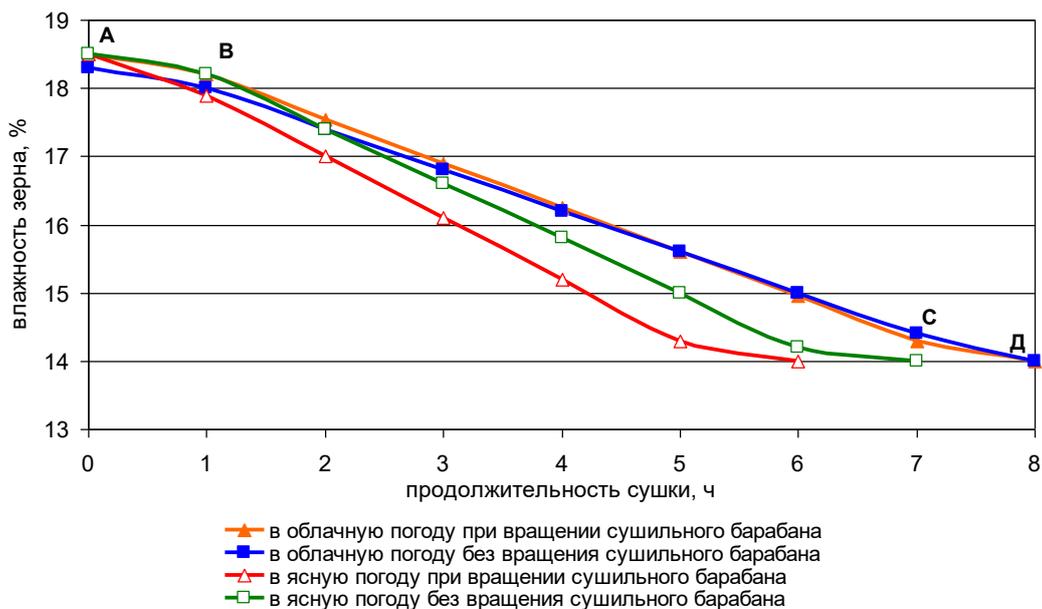


Рисунок 5.17 - Кривые сушки в дневное время суток

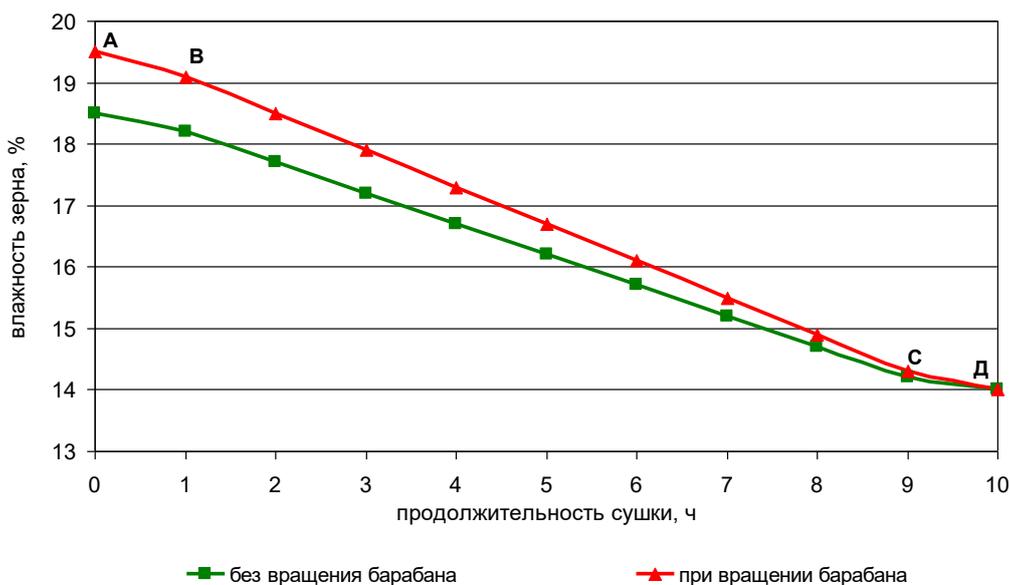


Рисунок 5.18 - Кривые сушки в ночное время суток

Анализ (рис. 5.17-5.18) показывает, что вращение барабана приводит к ускорению процесса сушки вследствие обеспечения контакта всей поверхности каждого зерна с сушильным агентом.

Скорость сушки это изменение влажности материала в единицу времени, %/час. В стадии прогрева скорость сушки увеличивается от нуля до максимального значения (рис. 5.19 - 5.20).

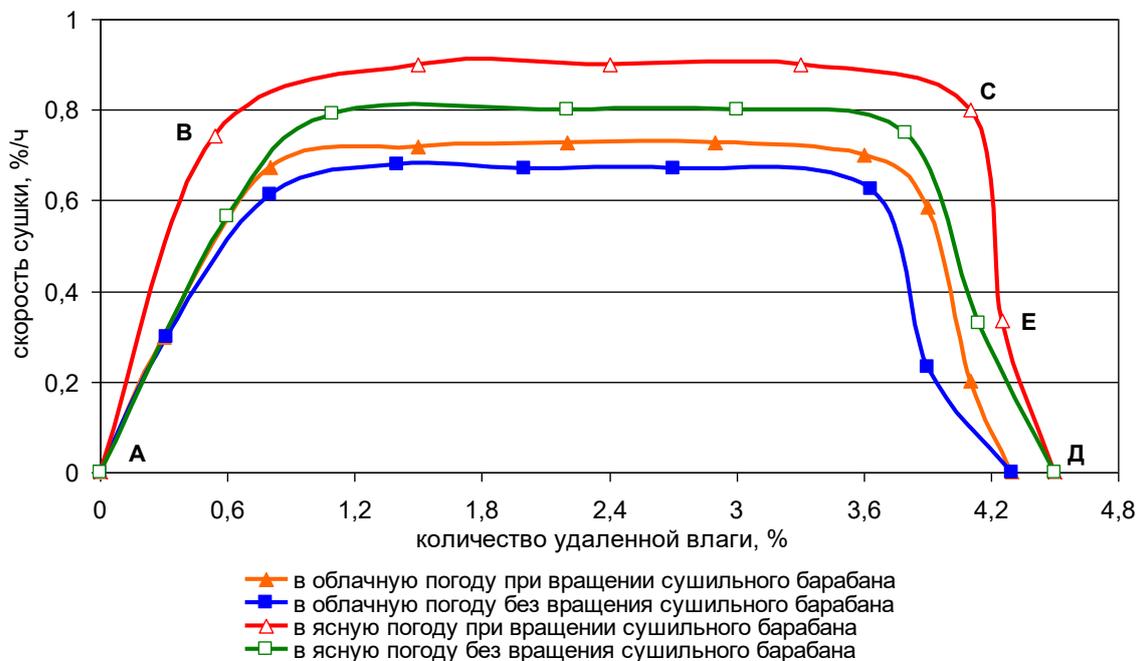


Рисунок 5.19 - Кривые скорости сушки в дневное время суток

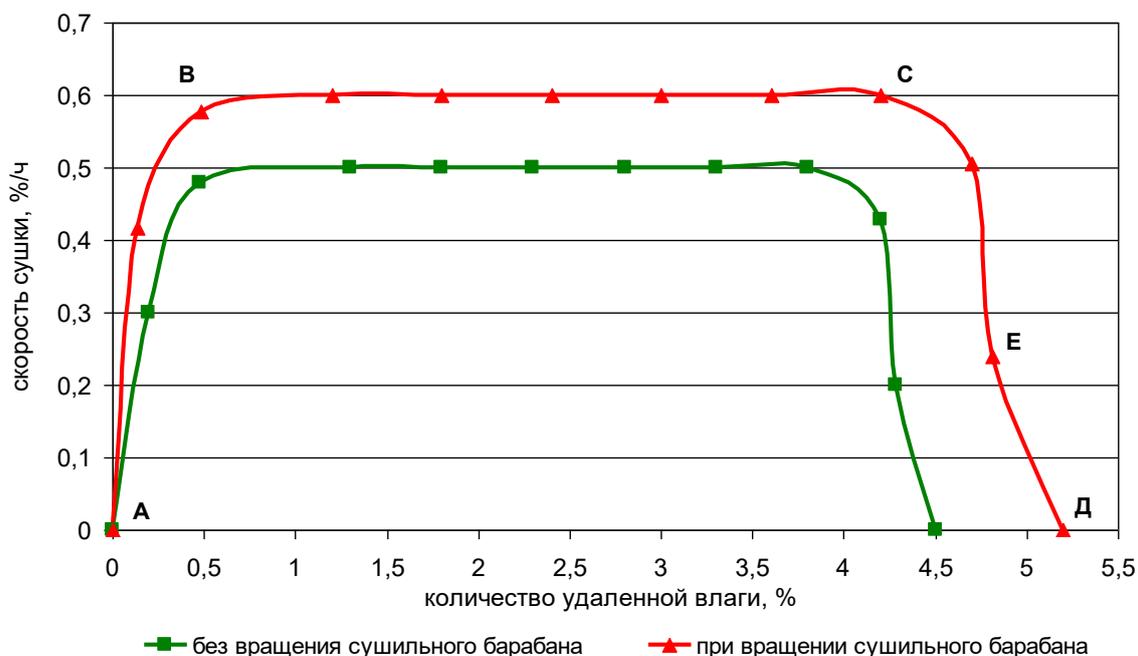


Рисунок 5.20 - Кривые скорости сушки в ночное время суток, с гравийным аккумулятором

В стадии прогрева скорость сушки описывается кривой *AB*. Линия *BC* идет параллельно оси абсцисс, т.е. скорость сушки постоянная. Этот период называют периодом постоянной скорости сушки. Точка *C* соответствует первой критической влажности. При сушке зерна имеется вторая критическая точка *E*, линия *CE* прямая, т.е. скорость сушки убывает равномерно, а линия *ED* имеет вид кривой, т.е. скорость сушки замедляется не равномерно, а ускоренно. Линия *AB* характеризует первый период сушки, линия *BC* - второй, а линия *CED* - третий период убывающей скорости сушки. В точке *D* скорость сушки равна нулю и эта точка соответствует равновесной влажности [54].

Скорость сушки при вращении барабана увеличивается как в дневное, так и в ночное время.

Температурная кривая характеризует изменение температуры зерна в процессе сушки (рис. 5.21).

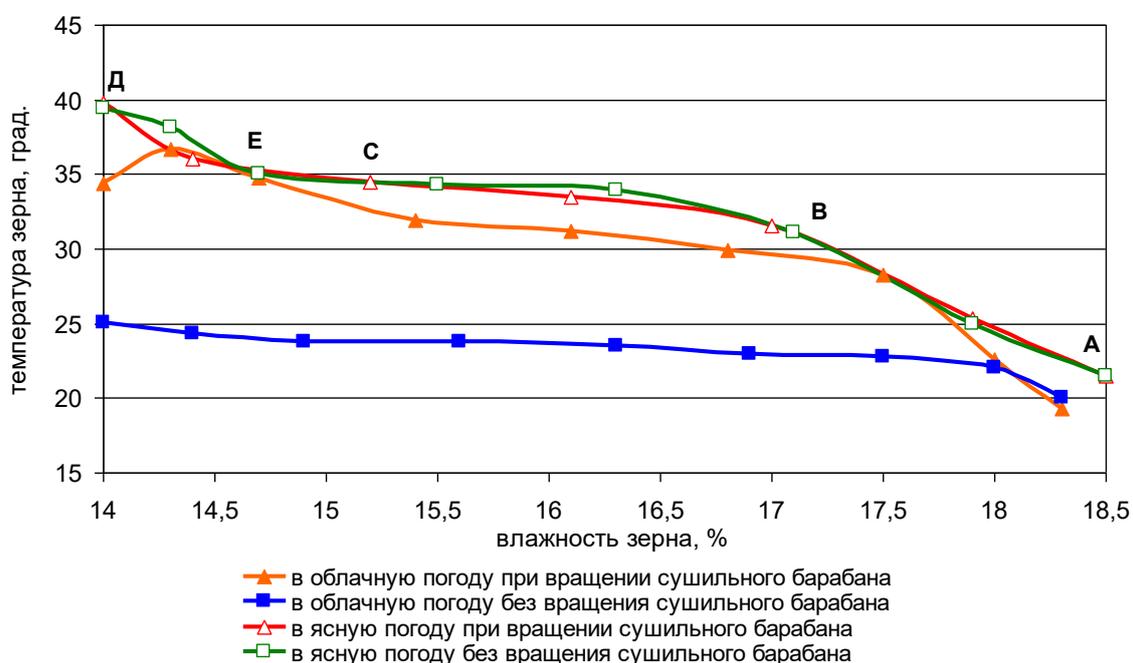


Рисунок 5.21 - Температурные кривые сушки в дневное время суток

В начале процесса температура зерна повышается. Этот период описывается кривой *AB* [54]. В дальнейшем температура зерна остается почти постоянной (линия *BC*). Линия *BC* соответствует второму периоду сушки. Таким образом, второй период сушки характеризуется не только постоянной скоростью сушки, но и постоянной температурой. Точка *C* характеризует первую критическую точку. Линия *CED* характеризует третий период убывающей скорости сушки и увеличения температуры зерна. Так как температура зерна зависит от температуры сушильного агента, а та в свою очередь от температуры окружающей среды, то в конце сушки наблюдается снижение температуры зерна и начинается естественное охлаждение. Температура зерна в точке *D* может достигнуть температуры агента сушки при условии, что в этот момент с поверхности зерна испарилась вся влага. В реальных условиях этого не наблюдается даже при влажности зерна 10...15 %.

В ночной период сушка зерна в гелиосушилке происходит за счет тепла, отдаваемого гравийным аккумулятором. Температуры зерна при этом только понижается. Температурная кривая приобретает иной вид (рис. 5.22).

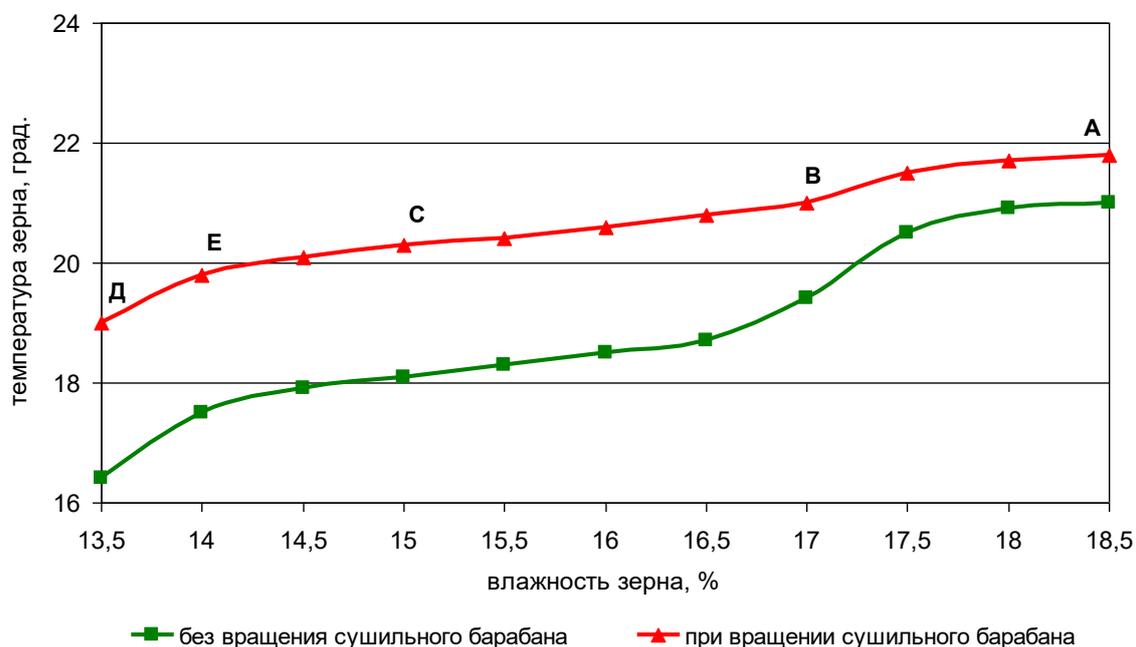


Рисунок 5.22 - Температурные кривые сушки в ночное время суток с гравийным аккумулятором

Анализ процесса сушки зерна позволяет сделать следующее заключение. Чем выше начальная влажность зерна, тем больше скорость сушки и тем короче первый период. Это объясняется тем, что вначале испаряется поверхностная влага. Влага из внутренних слоев зерна должна постоянно поступать к внешним слоям. Во второй период сушки количество испаренной влаги с поверхности зерна равно количеству влаги подведенной из внутренних слоев. Однако такое равновесие быстро нарушается, т.е. влага внутренних слоев не успевает подойти к внешней поверхности зерновки. Наступает третий период убывающей скорости сушки и углубление зоны испарения вовнутрь зерна.

Несмотря на разнообразие режимов и погодных условий при сушке зерна, кривые сушки имеют одинаковый характер, что позволяет установить соответствующие функциональные зависимости.

Вследствие непостоянства внешних факторов, связанных с погодными условиями, при обосновании конструктивно-технологических параметров барабанной гелиосушилke необходимо использовать усредненные значения соответствующих параметров.

Одним из важных факторов, определяющих эффективность сушки, является влагосодержание атмосферного воздуха d_o . По данным метеостанции среднее влагосодержание атмосферного воздуха в период испытаний составило 9,0 г/кг (рис. 5.23).

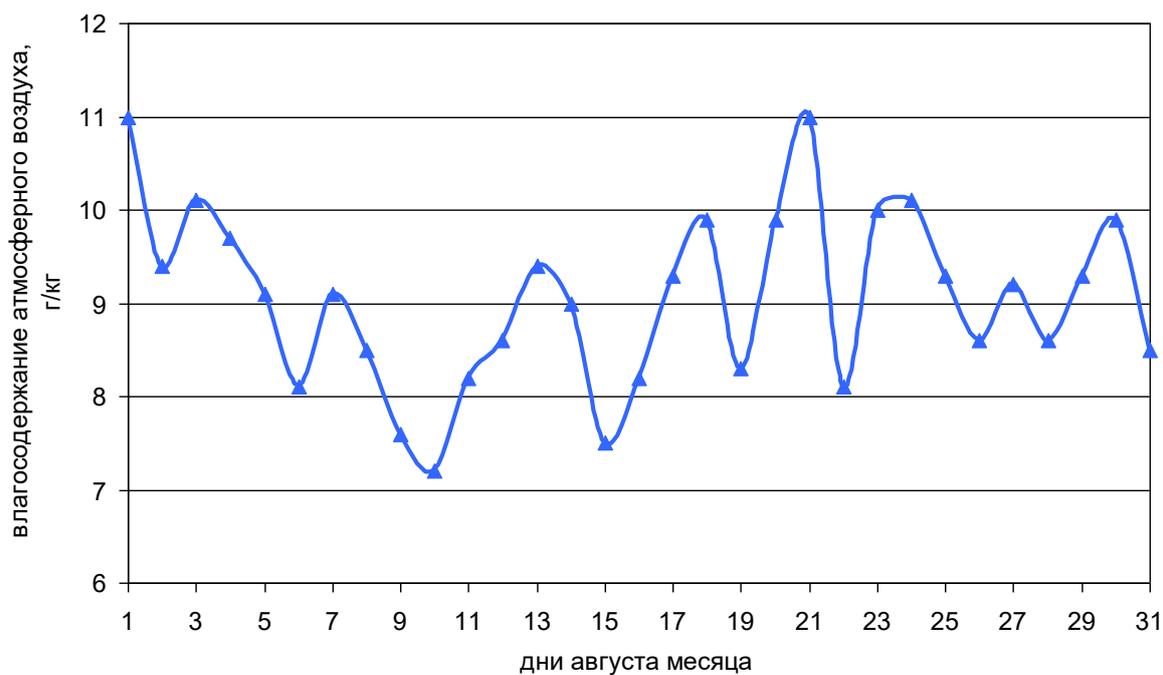


Рисунок 5.23 - Изменение влагосодержание атмосферного воздуха в августе 2009 года

Разница между влагосодержанием отработанного агента сушки d_1 и атмосферного воздуха d_o , определяет величину съёма влаги одним килограммом сушильного агента (рис. 5.24).

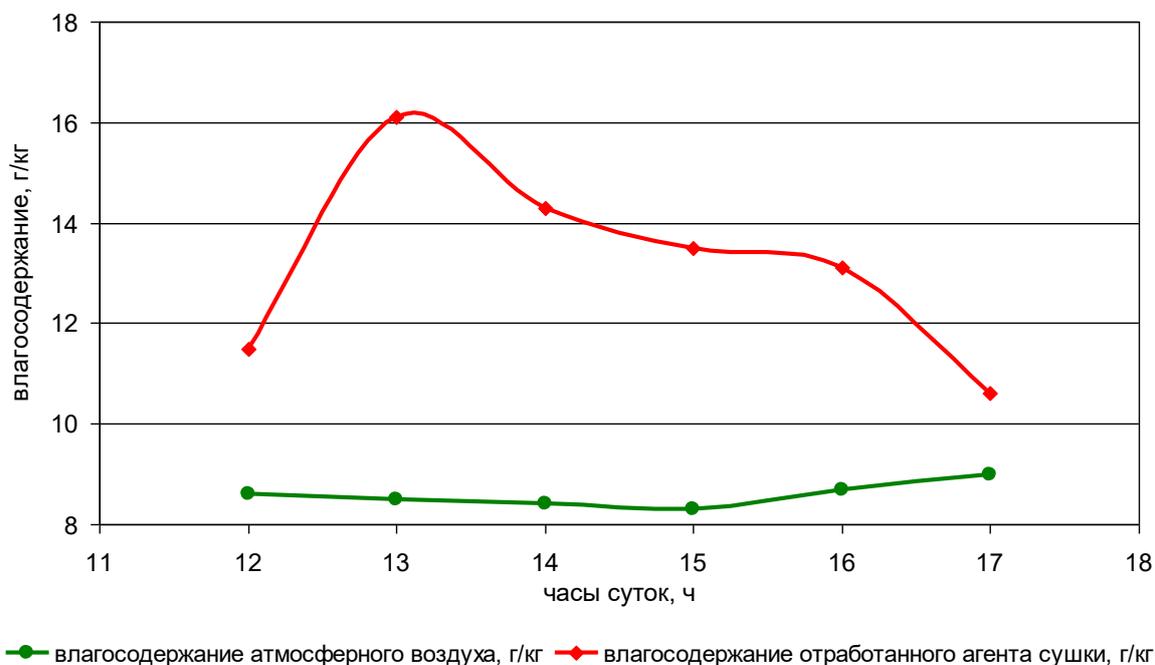


Рисунок 5.24 - Изменение величины съёма влаги в процессе сушки

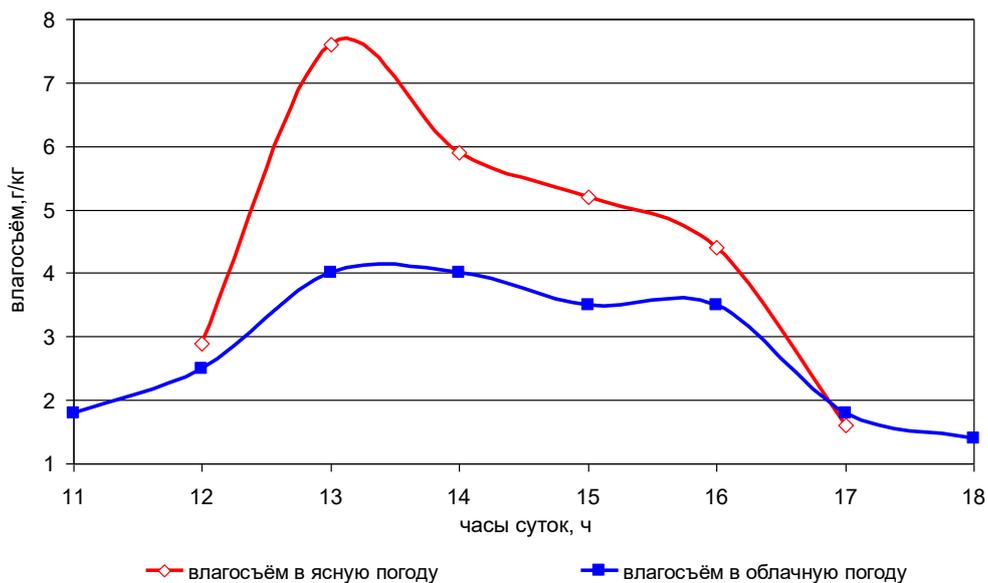


Рисунок 5.25 - Изменение влагосъёма в процессе сушки в ясную ($t_{O.C.H} = 18,1^{\circ}C$; $t_{O.C.K} = 29,1^{\circ}C$; $t_{O.C.MAX} = 31,1^{\circ}C$) и облачную погоду, при облачности в 4 балла ($t_{O.C.H} = 16,5^{\circ}C$; $t_{O.C.K} = 23,7^{\circ}C$; $t_{O.C.MAX} = 33,4^{\circ}C$)

Анализ рис. 5.25 показывает, что в ясную погоду процесс сушки протекает более интенсивно и соответствующие периоды сушки четко выражены.

Характер изменения влагосодержания отработанного сушильного агента в процессе сушки в ночное время суток представлен на рис. 5.26.

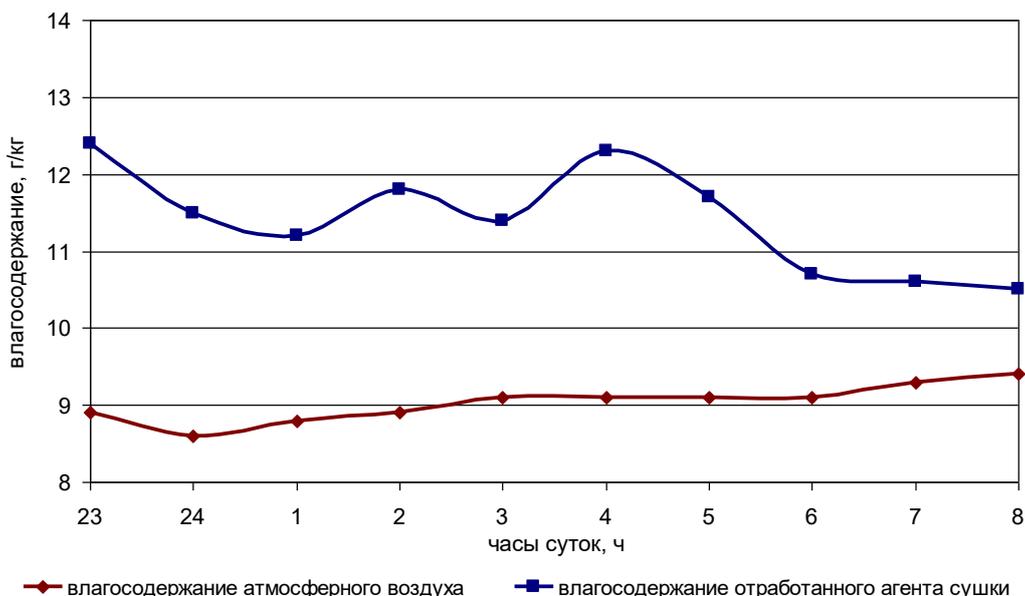
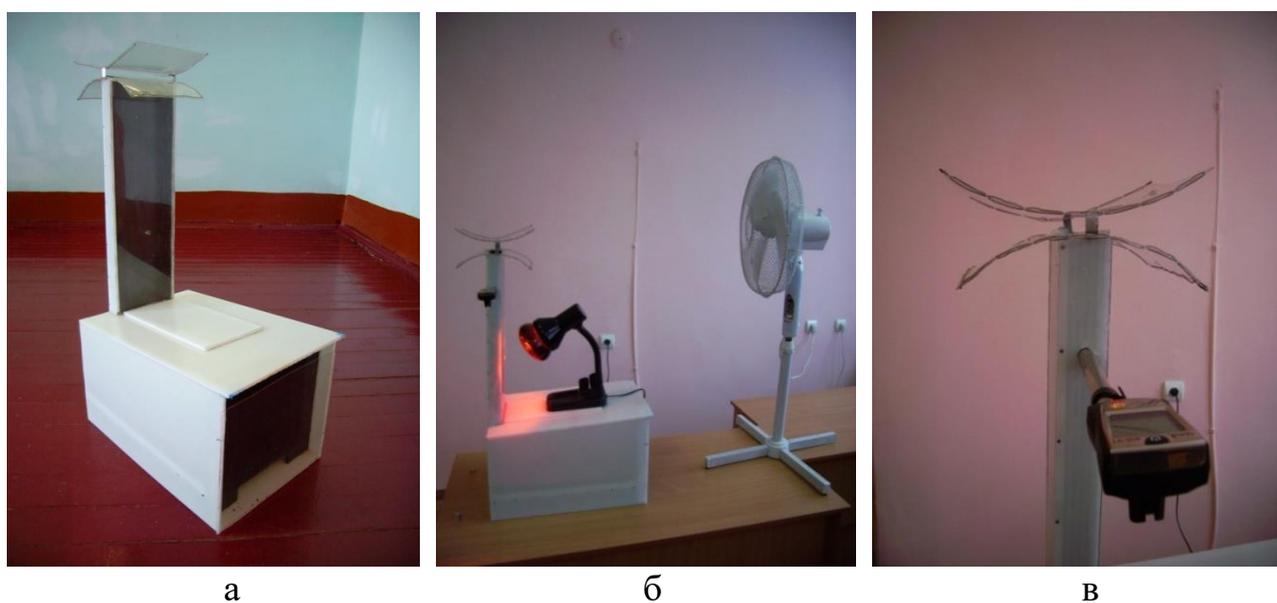


Рисунок 5.26 - Изменение влагосодержания отработанного сушильного агента в процессе сушки в ночное время суток ($t_{O.C.H} = 19^{\circ}C$; $t_{O.C.K} = 15,8^{\circ}C$)

Одним из важных конструктивных элементов барабанной гелиосушилки является вытяжная труба в виде солнечного коллектора с дефлектором, обеспечивающая усиление тяги в вытяжной трубе. Назначение дефлектора - защита от попадания атмосферных осадков внутрь гелиосушилки и усиление тяги в трубе за счет создания эффекта эжекции.

Поскольку параметры каждого конструктивного элемента должны быть обоснованы, возникла задача обоснования конструктивных параметров дефлектора, в частности, его формы, размера его сечения в средней части над вытяжной трубой. Необходимо было оценить также в целом влияние солнечного коллектора и дефлектора на усиление тяги в вытяжной трубе.

Были проведены лабораторные испытания макетного образца вытяжной трубы с дефлектором (рис. 5.27).



а - макет вытяжной трубы с дефлектором; б - имитация солнечного излучения; в - определение температуры и скорости прохождения воздуха через вытяжную трубу

Рисунок 5.27 - Исследование макета вытяжной трубы с дефлектором

Решетчатое дно макета было заполнено слоем пшена, толщиной 5 см для создания аэродинамического сопротивления сушильному агенту. Для имитации ветра использовали 3-х скоростной напольный вентилятор. Для имитации солнечного излучения использовали инфракрасную лампу мощностью 300 Вт, для определения температуры и скорости прохождения воздуха через вытяжную трубу использовали термоанемометр testo 405.

Были проведены опыты по определению скорости движения воздуха в вытяжной трубе без ее нагрева, с нагревом, на различных скоростях работы вентилятора и при различном сечении дефлектора над вытяжной трубой. Результаты представлены на рис. 5.28

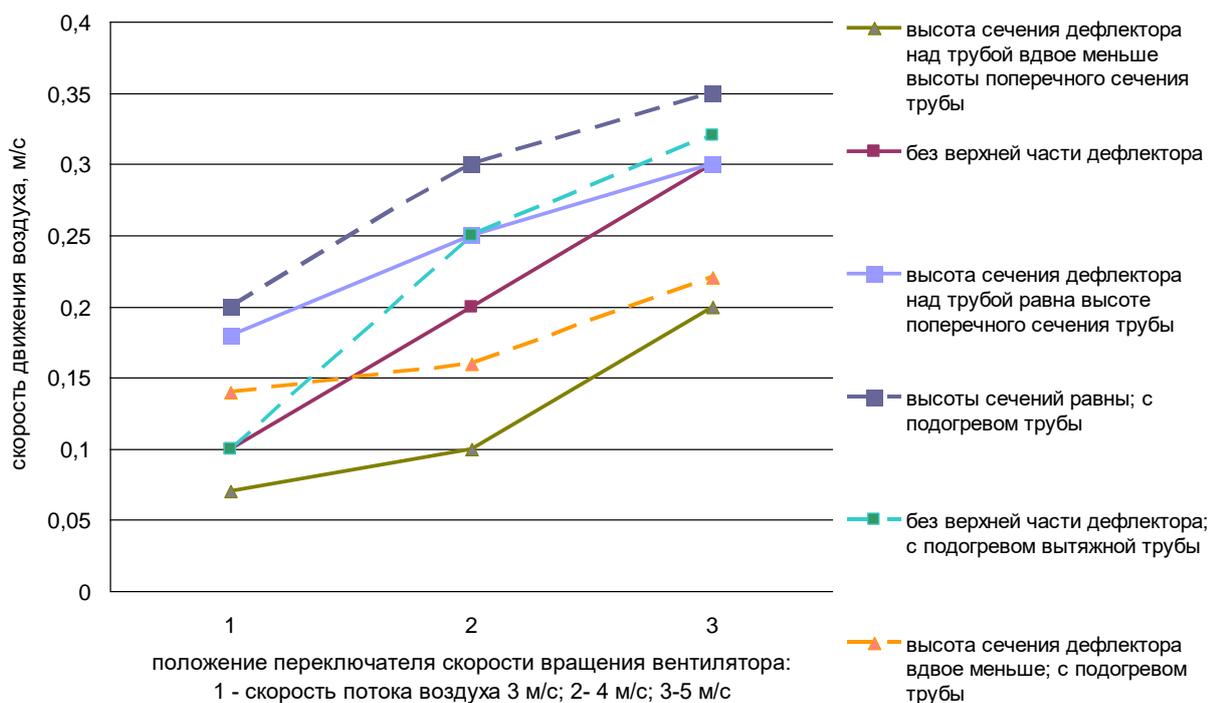


Рисунок 5.28 - Результаты испытания дефлектора

Анализ полученных результатов показывает, что при отсутствии нагрева вытяжной трубы наибольшая скорость движения воздуха в ней обеспечивается при равенстве высот поперечных сечений дефлектора и трубы, а наименьшая - при большем сечении трубы относительно дефлектора.

Это связано с тем, что при уменьшении сечения дефлектора увеличивается его гидравлическое сопротивление для выходящего из трубы воздушного потока. При равенстве сечений гидравлическое сопротивление уменьшается, а подсасывающее действие дефлектора вследствие понижения давления при увеличении скорости потока воздуха в сужении относительно дефлектора без верхней части - увеличивается. При нагреве вытяжной трубы скорость движения в ней воздуха увеличивается.

В следующей серии опытов была уменьшена вдвое высота выходного сечения вытяжной трубы при прочих равных условиях (рис. 5.29).



Рисунок 5.29 - Уменьшенное сечение вытяжной трубы

Результаты аналогичных испытаний дефлектора представлены на рис. 5.30.

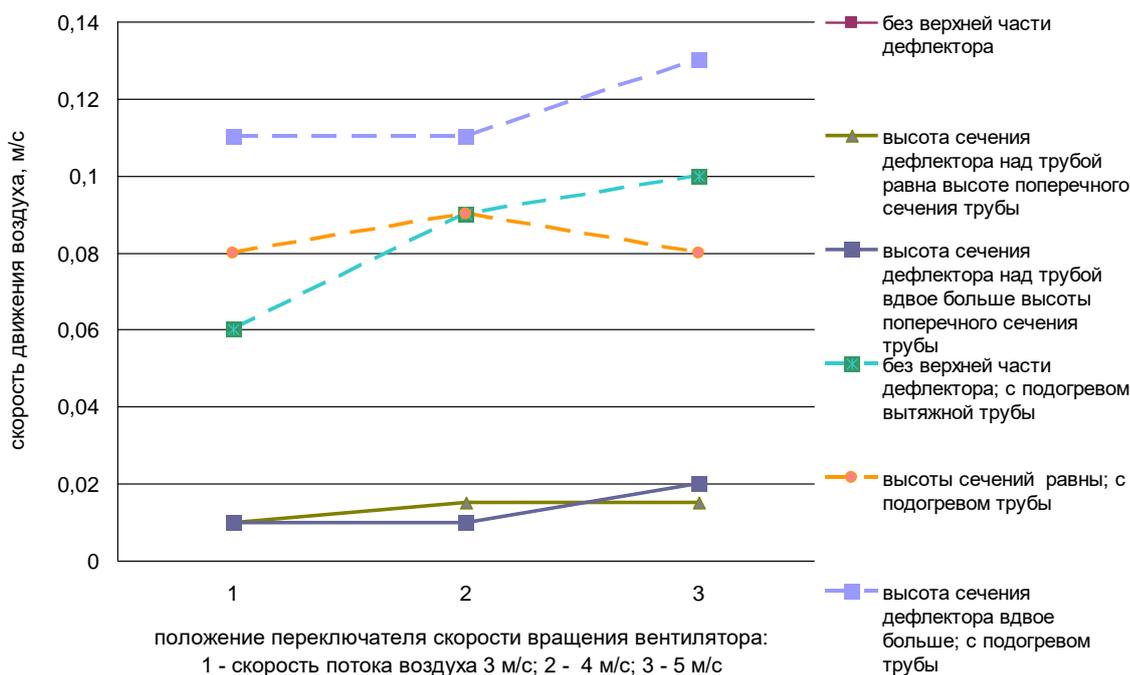


Рисунок 5.30 - Результаты испытания дефлектора при уменьшенном сечении вытяжной трубы

Анализ рис. 5.30 показывает, что уменьшение сечения вытяжной трубы увеличило ее гидравлическое сопротивление, что значительно уменьшило скорость движения воздуха во всех случаях. В данном случае подогрев вытяжной трубы однозначно способствовал увеличению скорости движения воздуха в вытяжной трубе.

Таким образом, лабораторные испытания показали эффективность предлагаемой конструкции вытяжной трубы в виде солнечного коллектора с дефлектором. Оптимальной конструкцией дефлектора следует считать равенство высот сечений дефлектора и вытяжной трубы (рис. 5.31).

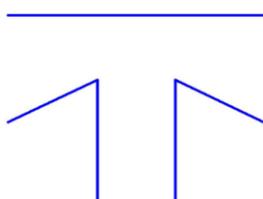


Рисунок 5.31 - Оптимальная форма дефлектора

При этом верхняя часть дефлектора для лучшей защиты от атмосферных осадков должна быть в виде плоской горизонтальной поверхности, а нижняя – в виде наклонных поверхностей, способствующих увеличению тяги в вытяжной трубе.

Влагосодержание обработанного сушильного агента связано с его расходом. На рис. 5.32 изображен расход сушильного агента за период сушки в зависимости от продолжительности сушки и от температуры окружающей среды днем, на рис. 5.33 - ночью.

Падение расхода сушильного агента в начале сушки при ясной погоде можно объяснить тем, что в случае вертикального коллектора при восходе солнца уменьшается угол падения солнечных лучей на тепловоспринимающую поверхность, она меньше нагревается и, соответственно, тяга уменьшается. В облачную погоду температура в верхнем коллекторе, в основном, определяется температурой окружающей среды. Поэтому расход сушильного агента более постоянен.

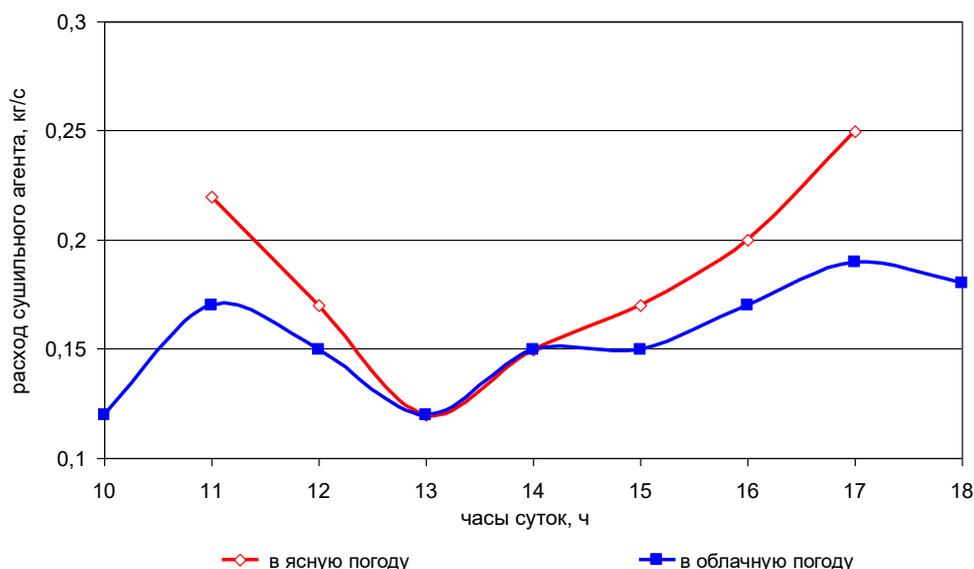


Рисунок 5.32 - Изменение расхода сушильного агента в процессе сушки в ясную ($t_{O.C.H} = 18,1^{\circ}C$; $t_{O.C.K} = 29,1^{\circ}C$; $t_{O.C.MAX} = 31,1^{\circ}C$) и облачную погоду, при облачности в 4 балла ($t_{O.C.H} = 16,5^{\circ}C$; $t_{O.C.K} = 23,7^{\circ}C$; $t_{O.C.MAX} = 33,4^{\circ}C$)

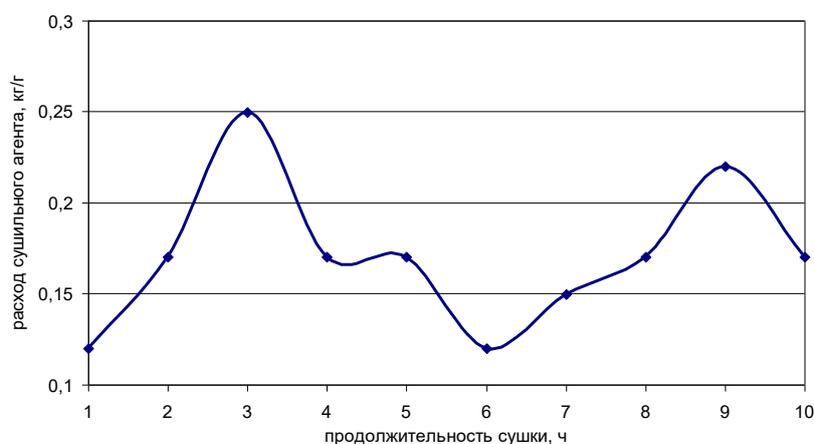


Рисунок 5.33 - Изменение расхода сушильного агента в процессе сушки в ночное время суток ($t_{O.C.H} = 19^{\circ}C$; $t_{O.C.K} = 15,8^{\circ}C$)

На основании экспериментальных данных получена регрессионная зависимость (рис. 5.34) средней температуры сушильного агента $t_{C_{Acп}}$ от средней дневной температуры окружающей среды t_{OCcp} за период сушки

$$t_{C_{Acп}} = 10,531 + 0,759 \cdot t_{OCcp} \quad (5.1)$$

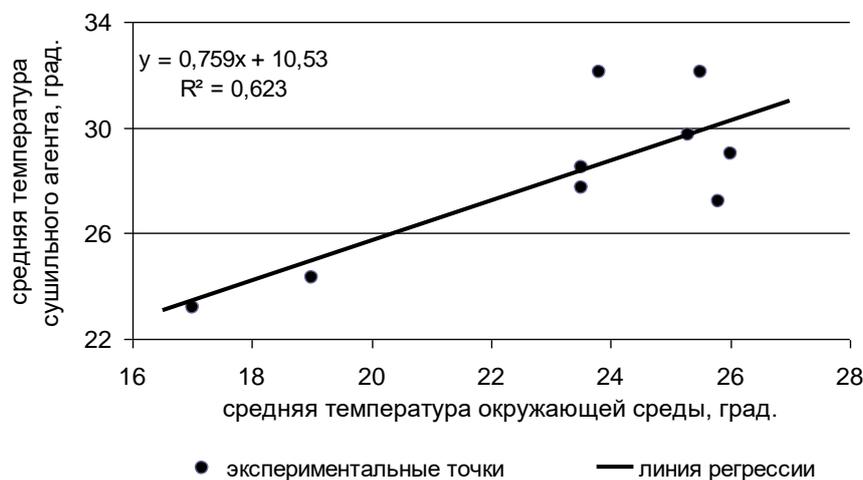


Рисунок 5.34 - Зависимость средней температуры сушильного агента от средней дневной температуры окружающей среды за период сушки

Коэффициент корреляции исходных данных, $R = 0,789$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,623$. Для данной регрессионной модели (при нулевой гипотезе об отсутствии корреляционной связи) F - критерий равен 11,57 на уровне $p = 0,05$ при табличном значении F -критерия равном 5,32, что свидетельствует об адекватности полученной модели. Проверка по t -критерию подтвердила достоверность доверительных интервалов коэффициентов регрессии.

Для обеспечения сушки зерна в ночное время, согласно формуле 2.28, гелиосушилка должна иметь соответствующие объём и массу гравийного аккумулятора:

$$V_{ак} = \frac{Q_{ак}}{c_{ак} \cdot \Delta t_m} = \frac{1029}{495000 \cdot 8} = 2,6 \text{ м}^3, \quad (5.2)$$

$$m_{ак} = V_{ак} \cdot \rho_{ак} = 2,6 \cdot 1125 = 2925 \text{ кг}, \quad (5.3)$$

где $Q_{ак}$ - количества энергии, аккумулируемой за день с 11 до 18 часов, Вт/день;

$c_{ак}$ - теплоемкость галечного аккумулятора, Дж/(м³·°C);

Δt_m - изменение температуры твердых частиц (гальки) при подводе и отводе теплоты, $\Delta t_m = 0,5 \cdot \Delta t_g = 8$ °C;

$\rho_{ак}$ - плотность гравийного аккумулятора, кг/м³.

Работа сушилки в ночное время обеспечивается за счёт энергии, накопленной в гравийном аккумуляторе. Изменение температуры в процессе его зарядки представлено на рис. (5.35).

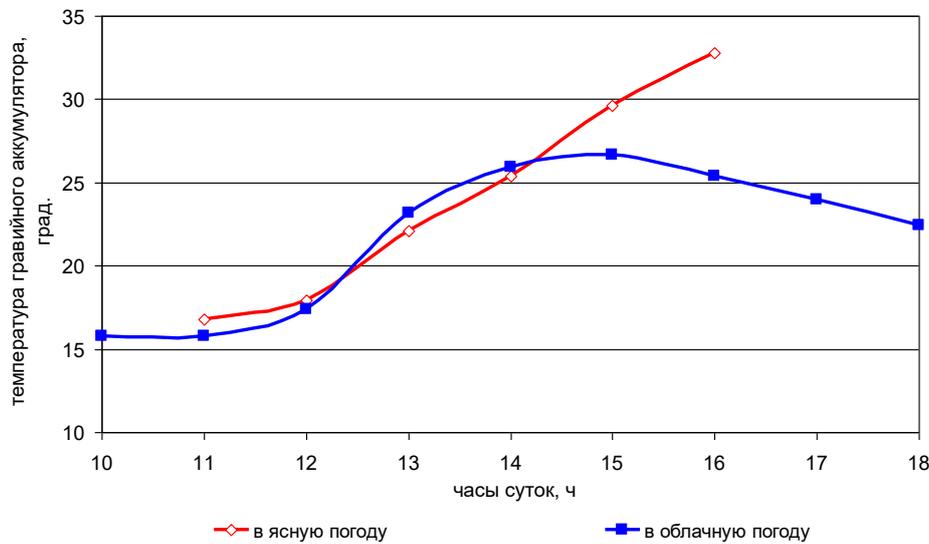


Рисунок 5.35 - Изменение температуры гравийного аккумулятора в процессе сушки в ясную ($t_{O.C.H} = 18,1^{\circ}C$; $t_{O.C.K} = 29,1^{\circ}C$; $t_{O.C.MAX} = 31,1^{\circ}C$) и облачную погоду, при облачности в 4 балла ($t_{O.C.H} = 16,5^{\circ}C$; $t_{O.C.K} = 23,7^{\circ}C$; $t_{O.C.MAX} = 33,4^{\circ}C$)

В ночное время происходит разрядка гравийного аккумулятора (рис. 5.36).

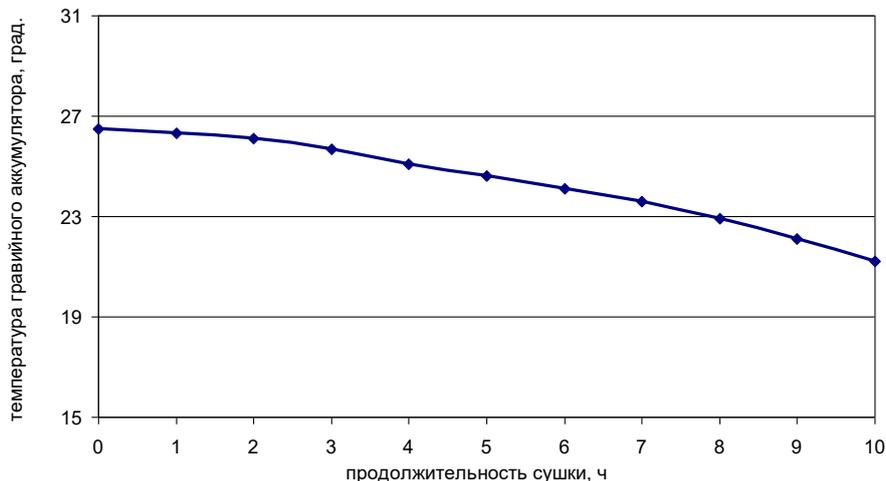


Рисунок 5.36 - Изменение температуры гравийного аккумулятора в процессе сушки в ночное время суток ($t_{O.C.H} = 19^{\circ}C$; $t_{O.C.K} = 15,8^{\circ}C$)

На основании экспериментальных данных получена регрессионная зависимость (рис. 5.37) начальной температуры гравийного аккумулятора $t'_{2.a.}$ от

средней утренней температуры окружающей среды на момент начала сушки зерна $t_{OC_{\text{уп}}}$

$$t'_{z.a.} = 1,266 + 0,927 \cdot t_{OC_{\text{уп}}} \quad (5.4)$$

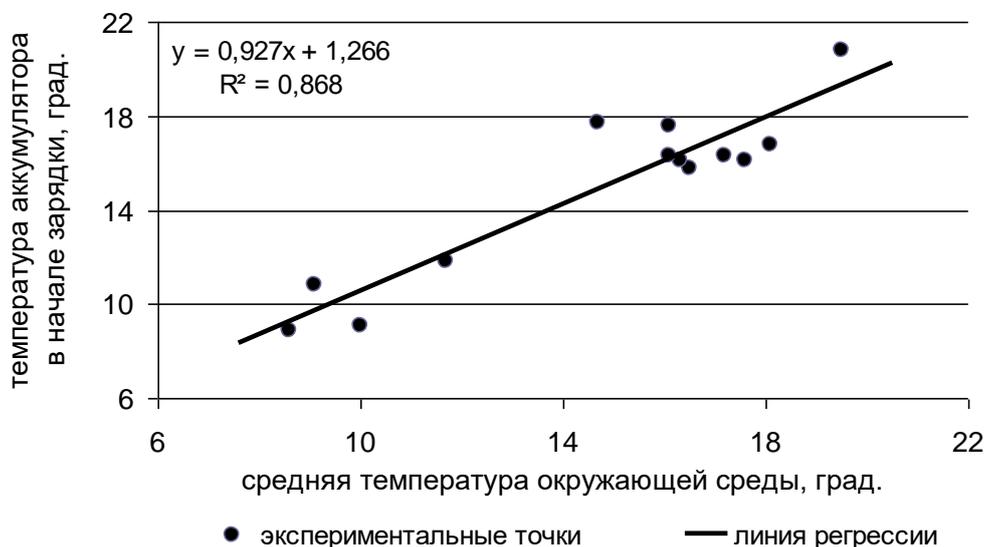


Рисунок 5.37 - Зависимость начальной температуры гравийного аккумулятора от средней утренней температуры окружающей среды на момент начала сушки

Коэффициент корреляции исходных данных $R = 0,931$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,868$. Для данной регрессионной модели F -критерий равен 72,5 на уровне $p = 0,05$ при табличном значении F -критерия равном 4,75, что свидетельствует об адекватности полученной модели. Проверка по t -критерию подтвердила достоверность доверительных интервалов коэффициентов регрессии.

На основании экспериментальных данных получена регрессионная зависимость (рис. 5.38) конечной температуры нагрева гравийного аккумулятора $t_{z.a.}$ от средней дневной температуры окружающей среды $t_{OC_{\text{дп}}}$ за период сушки

$$t_{z.a.} = 2,355 \cdot t_{OC_{\text{дп}}} - 20,956. \quad (5.5)$$

Коэффициент корреляции исходных данных $R = 0,900$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,810$. Для данной регрессионной модели F -критерий равен 25,63 на уровне $p = 0,05$ при табличном значении F -критерия равном 5,12, что свидетельствует об адекватности полученной модели. Проверка по t -критерию подтвердила достоверность доверительных интервалов коэффициентов регрессии.

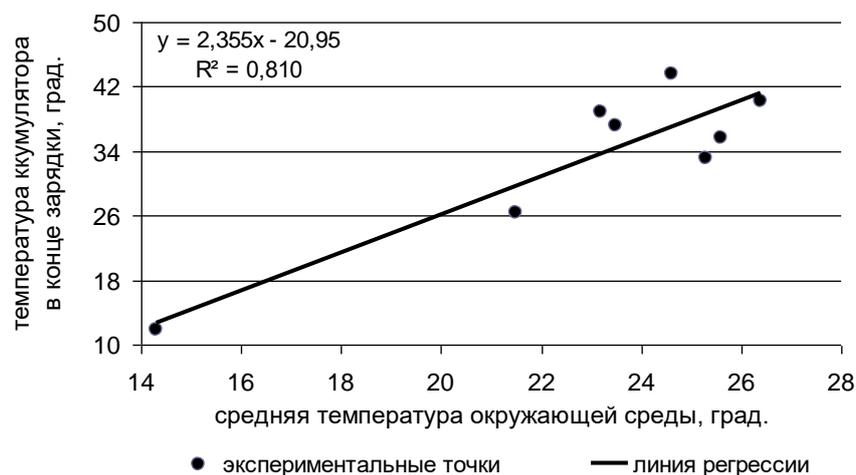


Рисунок 5.38 - Зависимость конечной температуры нагрева гравийного аккумулятора от средней дневной температуры окружающей среды за период сушки

Температура в сушильной камере определяет соответствующую температуру нагрева высушиваемого зерна.

На основании экспериментальных данных получена регрессионная зависимость (рис. 5.39) средней температуры в сушильной камере $t_{СКср}$ от средней температуры сушильного агента $t_{САср}$ за период сушки

$$t_{СКср} = 1,531 \cdot t_{САср} - 5,628. \quad (5.6)$$

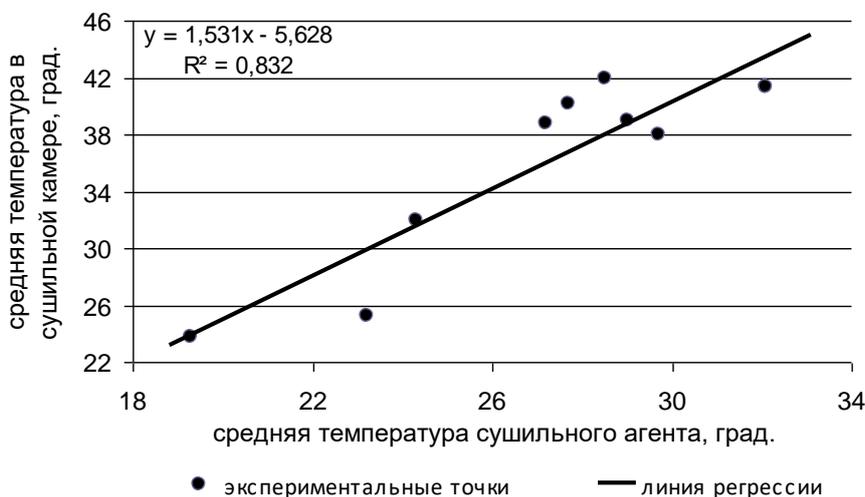


Рисунок 5.39 - Зависимость средней температуры в сушильной камере $t_{СКср}$ от средней температуры сушильного агента $t_{САср}$ за период сушки

Коэффициент корреляции исходных данных $R = 0,912$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,832$. Для данной регрессионной модели F - критерий равен 39,68

на уровне $p = 0,05$ при табличном значении F -критерия равном 5,12, что свидетельствует об адекватности полученной модели. Проверка по t -критерию подтвердила достоверность доверительных интервалов коэффициентов регрессии.

В процессе сушки необходимо, чтобы температура нагрева зерна не превышала установленные допустимые пределы в зависимости от назначения зерна. Изменение температуры нагрева зерна в процессе сушки представлено на (рис. 5.40).

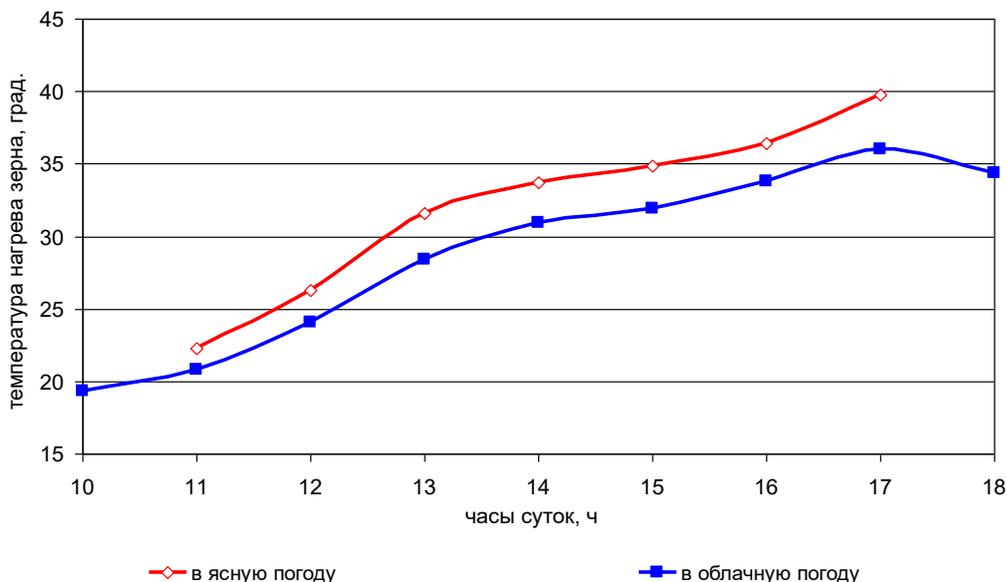


Рисунок 5.40 - Изменение температуры нагрева зерна в процессе сушки в ясную ($t_{O.C.H} = 18,1^{\circ}C$; $t_{O.C.K} = 29,1^{\circ}C$; $t_{O.C.MAX} = 31,1^{\circ}C$) и облачную погоду, при облачности в 4 балла ($t_{O.C.H} = 16,5^{\circ}C$; $t_{O.C.K} = 23,7^{\circ}C$; $t_{O.C.MAX} = 33,4^{\circ}C$)

На основании экспериментальных данных получена регрессионная зависимость (рис. 5.41) температуры нагрева зерна $t_{з.к.}$ от средней температуры в сушильной камере $t_{СКср}$:

$$t_{з.к.} = 2,621 + 0,878 \cdot t_{СКср}. \quad (5.7)$$

Коэффициент корреляции исходных данных $R = 0,983$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,968$. Для данной регрессионной модели F -критерий равен 242,18 на уровне $p = 0,05$ при табличном значении F -критерия равном 5,12, что свидетельствует об адекватности полученной модели. Проверка по t -критерию подтвердила достоверность доверительных интервалов коэффициентов регрессии.

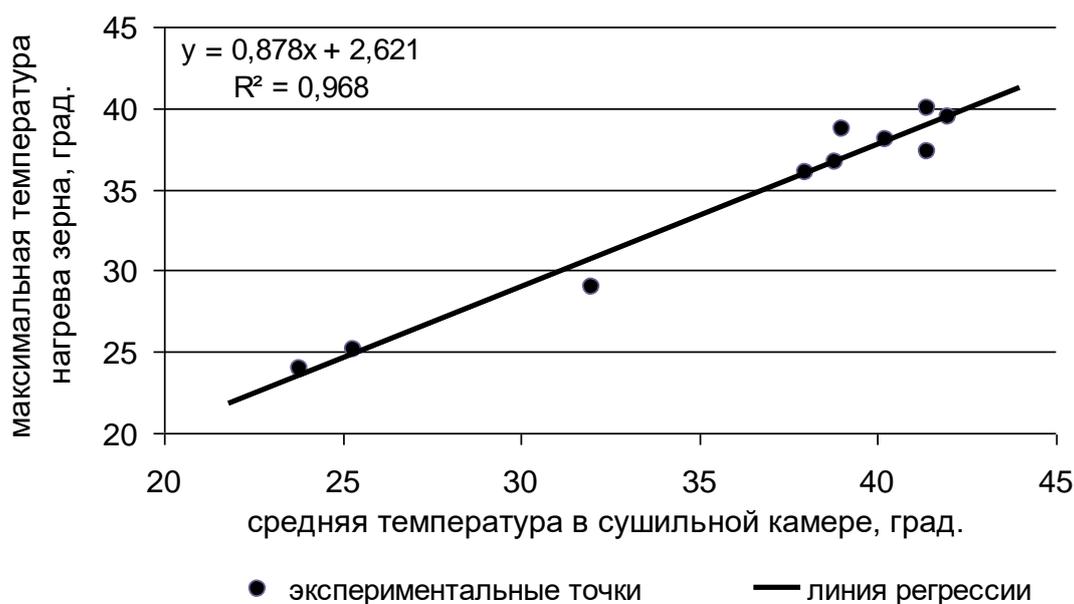


Рисунок 5.41 - Зависимость температуры нагрева зерна от средней температуры в сушильной камере

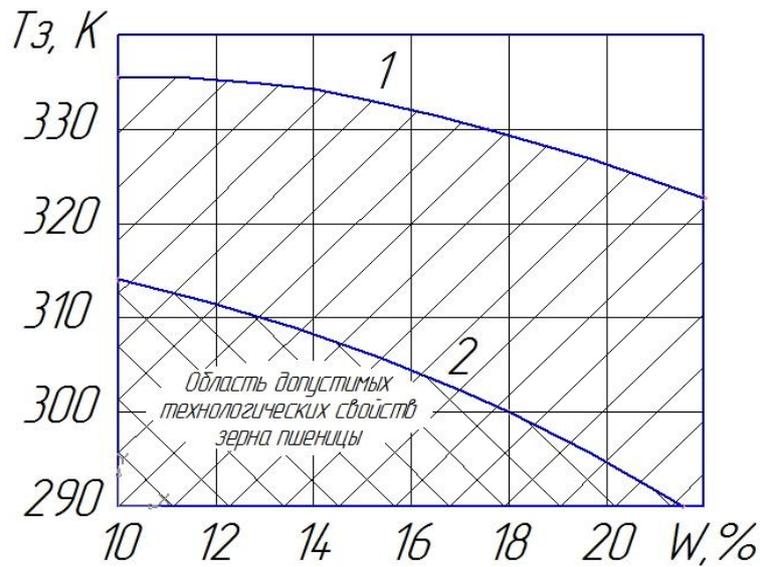
В процессе испытаний максимальная температура нагрева зерна, составила $39,8^{\circ}\text{C}$, при максимальной температуре окружающей среды $31,1^{\circ}\text{C}$ и температуре сушильного агента 52°C .

Из анализа выявленных закономерностей нагрева зерна и влияния режимных параметров на технологический процесс сушки зерна пшеницы во вращающемся барабане, следует, что повышение температуры теплоносителя интенсифицирует процесс и ведет к уменьшению времени сушки. Однако возможности повышения температуры ограничиваются технологическими требованиями, предъявляемыми к высушиваемому зерну, связывающими допустимую температуру нагрева пшеницы с ее влажностью [7].

В ходе опытов определялась температура зерновой массы, находившейся в барабане, или температура навески зерна, отобранной в виде проб, а не температура отдельных зерен. Поэтому полученные значения температуры нагрева зерна являются усредненными из-за незначительных расхождений по влажности и температуре каждого из зерен в массе.

В качестве ограничения области допустимых технологических свойств зерна пшеницы обычно используют кривую, полученную проф. В.И. Жидко (рис. 5.42) [53, 132]. Температурные кривые, полученные в ходе обработки опытных данных при сушке зерна пшеницы с нормальной клейковиной, лежат ниже указанного ограничения, поэтому соответствующие режимы могут применяться без ущерба для качества высушиваемого зерна.

Полученные графики свидетельствуют, что при сушке в выбранных режимах зависимость $T_3 = f(W)$ не выходит за установленные пределы, поэтому эти режимы не ухудшают качественные показатели высушиваемого зерна пшеницы с нормальной клейковиной.



1 - кривая, рекомендуемая проф. В.И. Жидко; 2 - кривая, при сушке в гелиосушилке

Рисунок 5.42. - Зависимость температуры нагрева от влажности зерна пшеницы во вращающемся барабане

В течение дня плотность потока солнечной радиации меняется и достигает максимального значения до $0,7 \text{ кВт/м}^2$. На основании экспериментальных исследований получена регрессионная зависимость (рис. 5.43) средней температуры окружающей среды $t_{\text{ОСр}}$ от плотности потока солнечной радиации $Q_{\text{Нср}}$ за период сушки:

$$t_{\text{ОСр}} = 0,026 \cdot Q_{\text{Нср}} + 12,81. \quad (5.8)$$

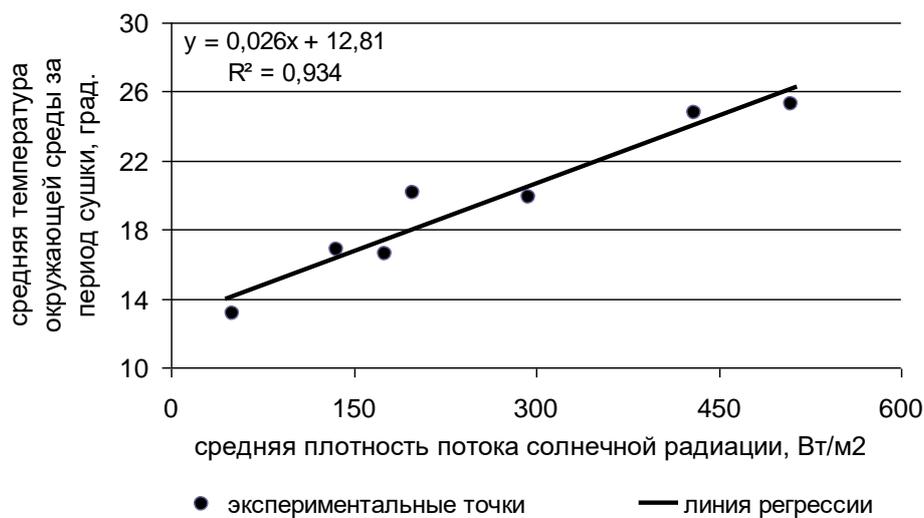


Рисунок 5.43 - Зависимость средней температуры окружающей среды от плотности потока солнечной радиации за период сушки

Коэффициент корреляции исходных данных $R = 0,966$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,934$. Для данной регрессионной модели F -критерий равен 71,21 на уровне $p = 0,05$ при табличном значении F -критерия равном 5,99, что свидетельствует об адекватности полученной модели. Проверка по t -критерию подтвердила достоверность доверительных интервалов коэффициентов регрессии.

Верхний солнечный коллектор обеспечивает подогрев отработанного сушильного агента, что увеличивает его скорость движения на выходе из вытяжной трубы и, соответственно, расход агента (рис. 5.44).

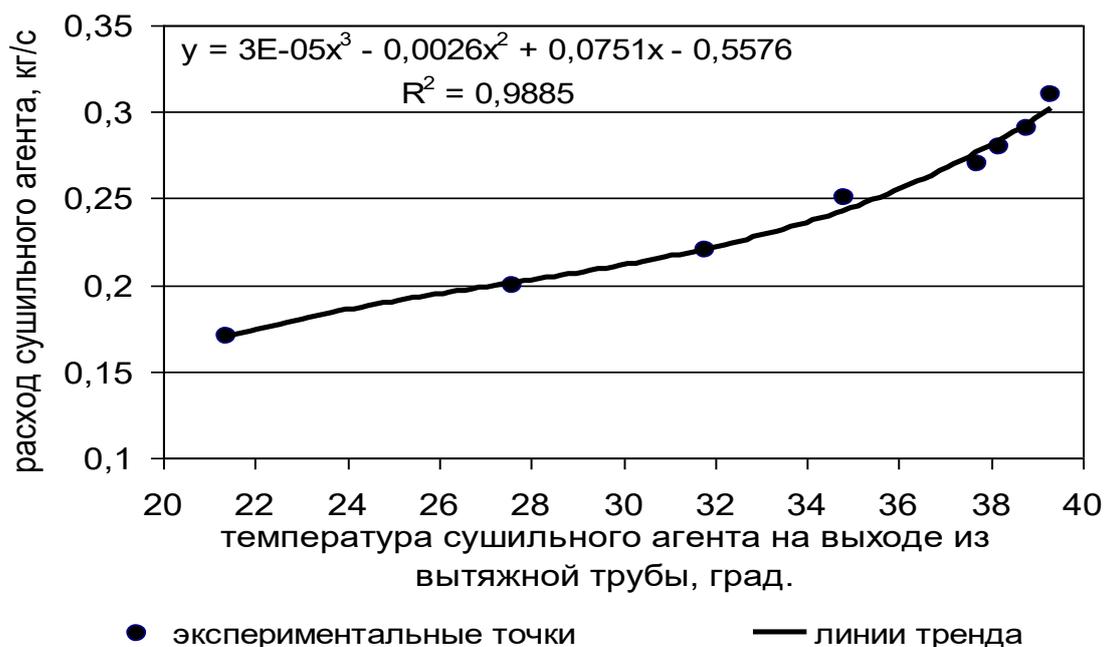


Рисунок 5.44 - Зависимость расхода сушильного агента от его температуры на выходе из верхнего солнечного коллектора

На основании экспериментальных исследований получена регрессионная зависимость (рис. 5.45) температуры воздуха на выходе из верхнего солнечного коллектора t_3 от температуры окружающей среды t_{0c} :

$$t_3 = 1,317 \cdot t_{0c} + 0,543 \quad (5.9)$$

Коэффициент корреляции исходных данных $R = 0,994$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,989$. Для данной регрессионной модели F -критерий равен 58,56 на уровне $p = 0,05$ при табличном значении F -критерия равном 5,59, что свидетельствует об адекватности полученной модели. Проверка по t -критерию подтвердила достоверность доверительных интервалов коэффициентов регрессии.

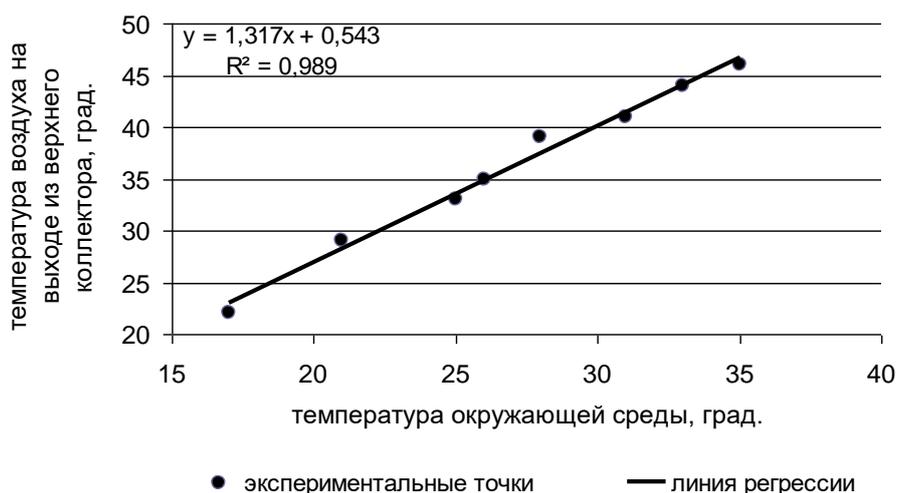


Рисунок 5.45 - Зависимость температуры воздуха на выходе из верхнего солнечного коллектора от температуры окружающей среды на 15 часов дня

На температуру в сушильной камере кроме интенсивности солнечной радиации влияет площадь нижнего коллектора.

Исследование влияния площади поверхности солнечных коллекторов гелиосушки на её теплотехнические характеристики показало, что уменьшение площади поверхности верхнего коллектора уменьшает расход сушильного агента, что приводит к более высокой температуре в сушильной камере даже при уменьшении площади поверхности нижнего коллектора (рис. 5.46-5.47).

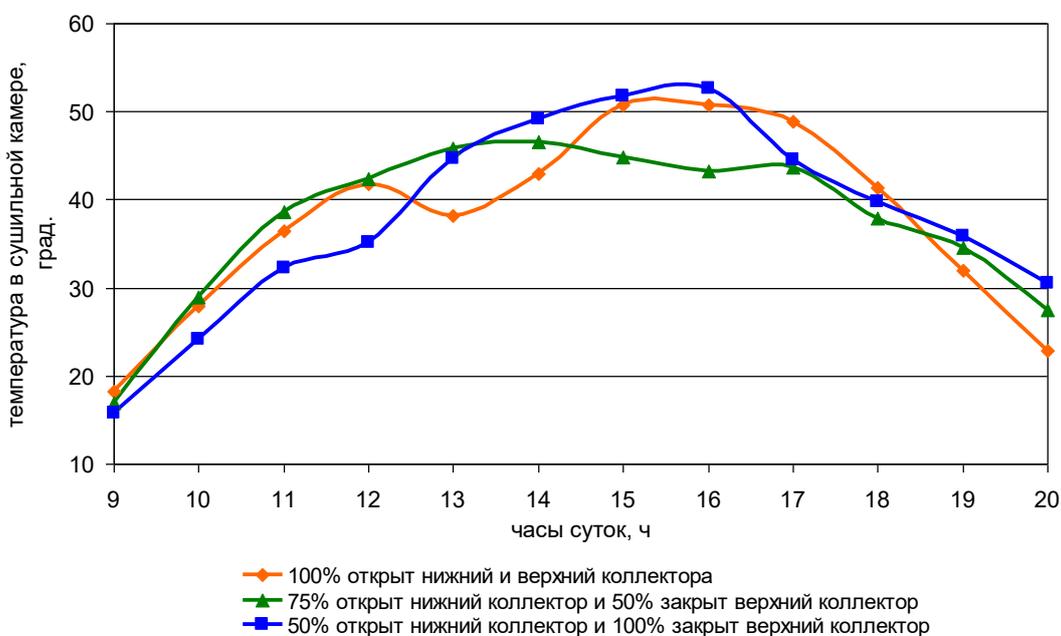


Рисунок 5.46 - Изменение температуры в сушильной камере в течение дня в зависимости от площади поверхности солнечных коллекторов

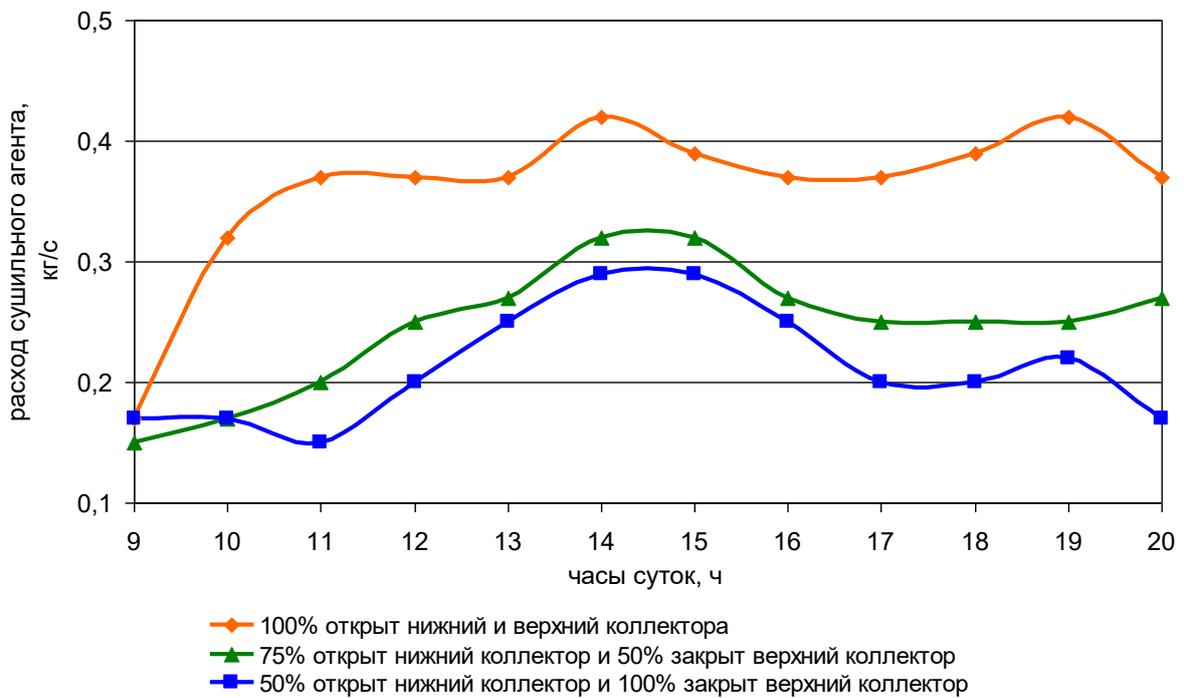


Рисунок 5.47 - Изменение расхода сушильного агента в течение дня в зависимости от площади поверхности солнечных коллекторов

Аналогичная тенденция наблюдается и в ночное время (рис.5.48-5.49).

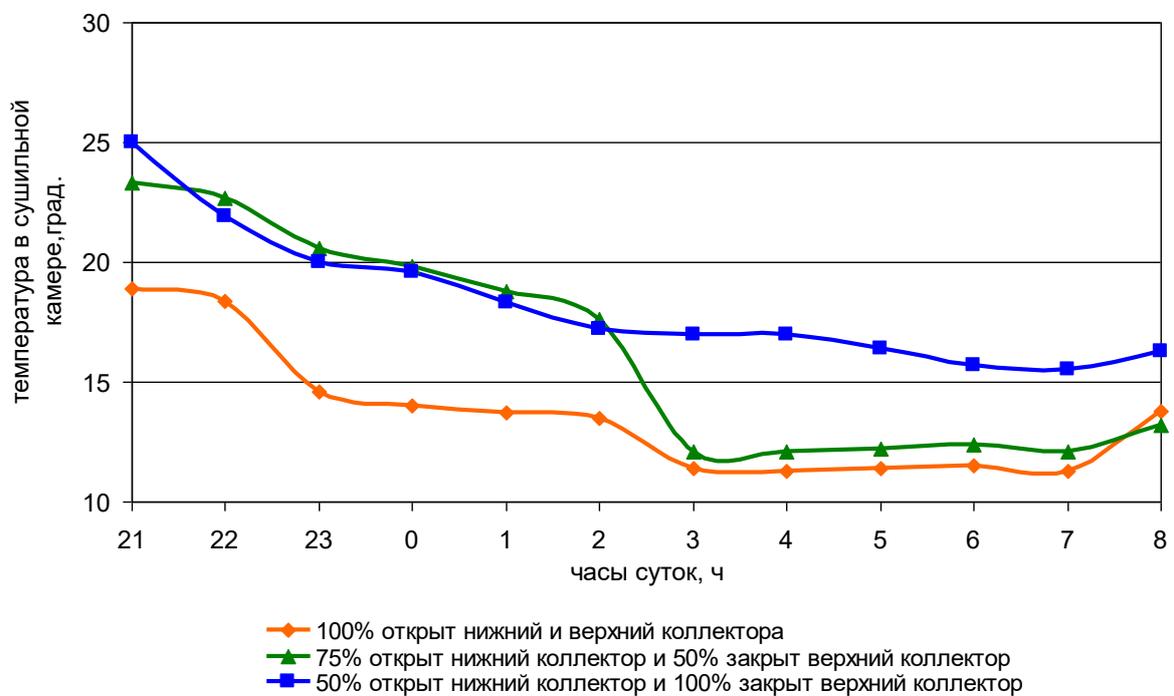


Рисунок 5.48 - Изменение температуры в сушильной камере в ночное время суток в зависимости от площади поверхности солнечных коллекторов

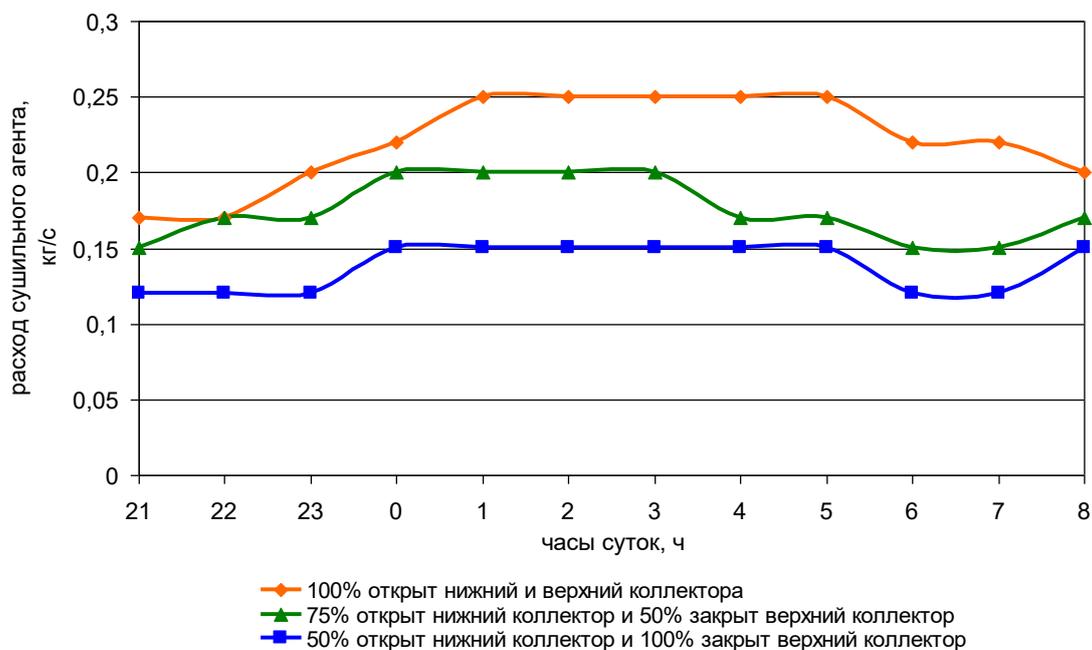


Рисунок 5.49 - Изменение расхода сушильного агента в ночное время суток в зависимости от площади поверхности солнечных коллекторов

Регулирование расхода сушильного агента путем изменения входного сечения нижнего коллектора и выходного сечения верхнего коллектора показало, что уменьшение проходного сечения нижнего коллектора больше повышает температуру в сушильной камере, чем верхнего коллектора (рис. 5.50).

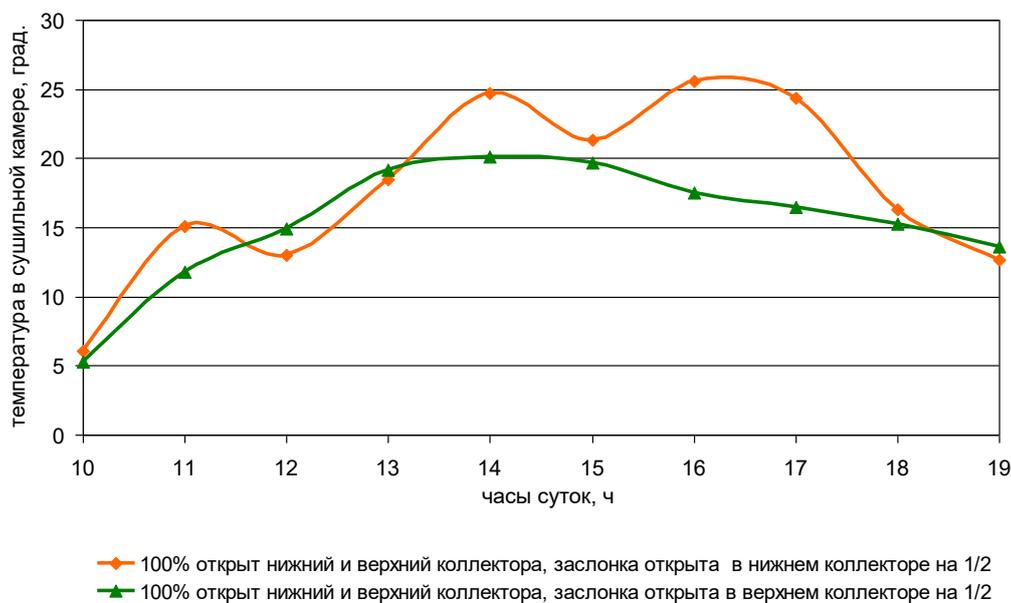


Рисунок 5.50 - Изменение температуры в сушильной камере в течение суток в зависимости от площади входного сечения солнечных коллекторов

При низких температурах атмосферного воздуха увеличение площади поверхности нижнего коллектора повышает температуру в сушильной камере даже при увеличении площади тепловоспринимающей поверхности верхнего коллектора (рис. 5.51).

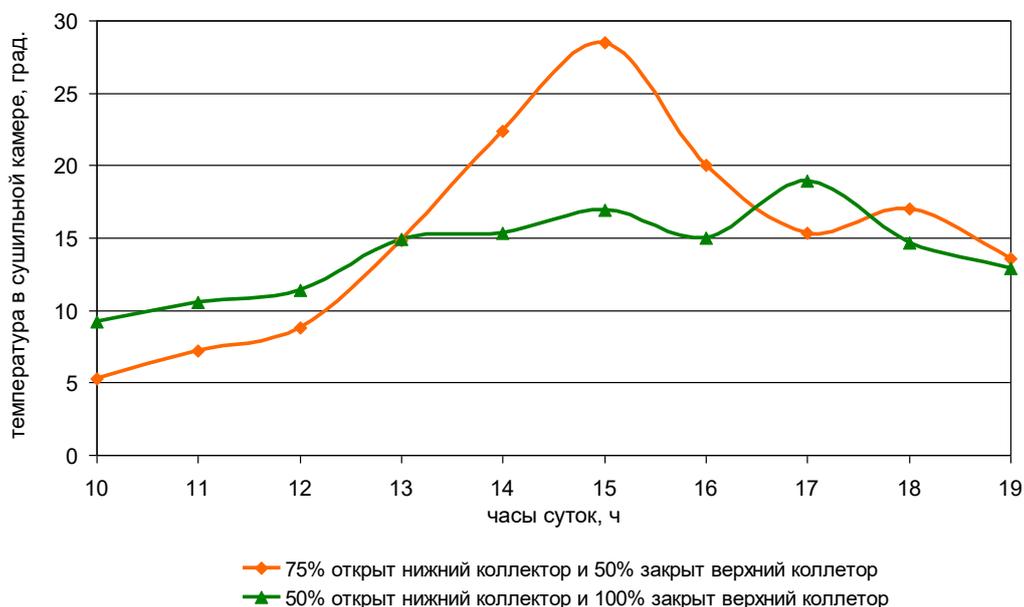


Рисунок 5.51 - Изменение температуры в сушильной камере в течение суток в зависимости от площади поверхности солнечных коллекторов

Основными факторами, определяющими время сушки зерна, являются площадь нижнего солнечного коллектора и температура окружающей среды, связанная с уровнем солнечной активности.

Для установления взаимосвязи между этими параметрами был реализован двухфакторный эксперимент с варьированием независимых переменных на двух уровнях (при исходной влажности зерна 18,3 %). Матрица планирования эксперимента [28, 68] в раскодированном виде с полученными значениями функции отклика представлена в табл. 5.4.

Таблица 5.4 - Матрица планирования двухфакторного эксперимента

№ опыта	Факторы		Функция отклика
	площадь нижнего коллектора $F_H, \text{м}^2$	максимальная дневная температура окружающей среды $t_{O.C.MAX}, ^\circ\text{C}$	среднее время сушки зерна $\tau_{суш}, \text{ч}$
1	4,16	24	9,0
2	8,32	24	8,0
3	4,16	30	7,4
4	8,32	30	6,5

На основании экспериментальных данных получена соответствующая регрессионная зависимость

$$\tau_{\text{суш.}} = 16,125 - 0,228 \cdot F_H - 0,258 \cdot t_{O.C.MAX} \quad (5.8)$$

Коэффициент детерминации модели $R^2 = 0,99$. Для данной регрессионной модели F -критерий равен 661 на уровне $p = 0,05$ при табличном значении F -критерия равном 18,51, что свидетельствует об адекватности полученной модели.

Поверхность функции отклика представлена на рис. 5.52.

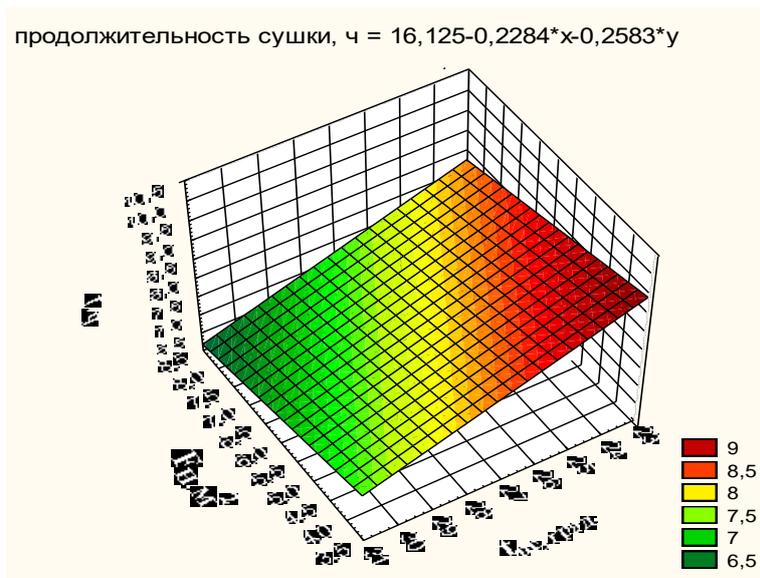


Рисунок 5.52 - График поверхности функции отклика

Двумерное сечение поверхности отклика представлено на рис. 5.53.

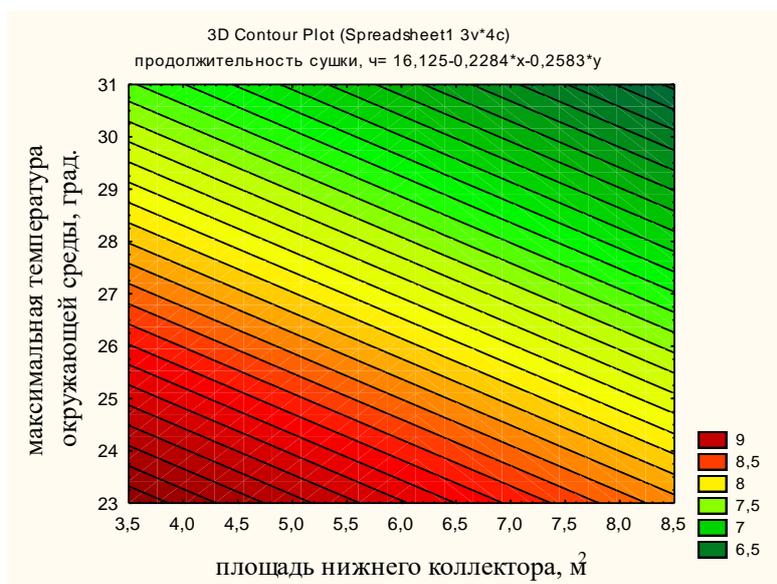


Рисунок 5.53 - Двумерное сечение поверхности отклика

При фактическом времени сушки 6,5 ч согласно формуле 2.89 расчетная продолжительность сушки составила

$$\begin{aligned} \tau_{\text{суш.}} &= \frac{1}{N} \left[\omega_{\text{з.н.}} - \omega_{\text{к.л.}} + 2,3 \cdot (\omega_{\text{к.л.}} - \omega_p) \cdot \lg \frac{\omega_{\text{к.л.}} - \omega_p}{\omega_{\text{з.к.}} - \omega_p} \right] = \\ &= \frac{1}{0,75} \cdot \left[18,3 - 16,2 + 2,3 \cdot (16,2 - 12) \cdot \lg \frac{16,2 - 12}{14 - 12} \right] = 6,1 \text{ часа} \end{aligned} \quad (5.9)$$

Отклонение фактического и расчетного времени составило 6,15 %.

Сушилка обеспечивает гарантированное высушивание партии зерна за 6...7 часов дневного времени и партии зерна за ночное время. Удельная нагрузка составляет до 60 кг зерна на квадратный метр площади горизонтального солнечного коллектора. При этом обеспечивается сушка партий зерна, имеющих различную влажность.

Гравийный аккумулятор и увеличенная тяга в вытяжной трубе препятствуют образованию конденсата в сушилке и повышению влажности зерна в период дождей. Это позволит хранить в сушилке влажное зерно в течение такого периода без опасности его самосогревания.

Барабанная гелиосушилка зерна испытана также на сушке зернобобовых культур. В сравнении с напольной сушилкой и барабанной с электроподогревом воздуха гелиосушилка имеет одинаковую скорость сушки при значительном снижении энергозатрат на процесс. Повышение эффективности гелиосушки обеспечивается организацией движения воздуха в сушилке через гравийный аккумулятор тепла, наличием вертикального солнечного коллектора в виде вытяжной трубы, а также соплообразного дефлектора, позволяющих значительно усилить тягу в сушилке.

Требуемая мощность на вращение барабана составила 0,2 кВт в отличие от напольной сушилки, имевшей установленную мощность 13 кВт.

Важным технологическим преимуществом гелиосушилок является возможность использования их для прогрева семян перед посевом для повышения их энергии прорастания и всхожести [103].

Эффективным приемом подготовки семян к посеву является их воздушно-тепловой обогрев. Он обеспечивает особенно хорошие результаты в том случае, когда созревание и уборка проходили при пониженных температурах и повышенной влажности. В таких условиях обогрев повышает энергию прорастания и полевую всхожесть семян. Особенно полезен обогрев семян озимых хлебов, если высевают свежееубранные семена. Свежееубранные семена обычно имеют высокую жизнеспособность, но низкую всхожесть, поэтому их рекомендуют перед посевом прогреть [109, 119, 131, 138].

Объективным критерием является полевая всхожесть, которая показывает, как послеуборочная обработка зерновой массы влияет на качественные показатели зерна.

Известно, что воздушно-тепловой обогрев семян перед посевом увеличивает энергию прорастания на 4...22 %, повышает полевую всхожесть зерна на

15...18 %, урожайность на 1,5...3 ц/га при улучшении качественных показателей зерна (клейковина, качество клейковины, стекловидность) [109].

При использовании высокотемпературных сушилок для этих целей зерно выдерживается в ней в течение 2...3 часов при температуре 40...42 °С. При этом тратится значительное количество топлива [61].

Исследования показали, что барабанная гелиосушилка позволяет осуществить данную технологическую операцию без затрат энергоносителей в режиме камерной сушилки, т.е. без вращения барабана. Полевые испытания в Выгоничском ГСУ Брянского филиала ФГУ «Госсорткомиссия» Выгоничского района Брянской области и учебной научно-производственной машинно-технологической опытно-испытательной станции Брянского ГАУ подтвердили эффективность данной технологической операции.

Результаты полевых испытаний показателей качества исследуемого зерна пшеницы представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 - Характеристика и показатели качества исследуемого зерна пшеницы

Наименование показателей	Среднее значение показателей контрольной партии зерна (принимаем за 100 %)	Значение показателей при послеуборочной сушке зерна в гелиосушилке			
		посев зерна без прогрева		посев зерна с прогревом в гелиосушилке	
		натур. единицы	среднее откл., %	натур. единицы	среднее откл., %
натура, г/л	740	742,5	+0,3	751,5	+1,6
клейковина, %	73,5	74	+0,7	77,5	+5,4
качество клейковины, усл.ед.	22,5	23,5	+4,4	25,5	+13,3
стекловидность, %	41	41	—	46	+12,2
масса 1000 зерен, г	46,6	47,9	+2,8	54,4	+16,7
полевая всхожесть, млн.шт./м ²	4,65	4,65	-	5,4	+16,1
урожайность, ц/га	48,8	48,8	-	51,8	+7,7

В процессе исследований условия хранения зерна, а также агротехнические требования и показатели перед посевом (гумус, рН, азот легкогидролизуемый, Р₂О₅, К₂О), количество вносимых удобрений под культуру были одинаковы для каждого из исследуемого сорта пшеницы. Тип почвы характерный для данной местности - суглинистый. Площадь делянки под посев составляла 50 м², норма высева 5,5 млн. зерен на га.

Результаты показывают, что применение барабанной гелиосушилки в процессе сушки зерна не ухудшает, а по некоторым показателям увеличивает качественные показатели пшеницы. Это ещё раз доказывает, что мягкий режим тепловой обработки зерна, используемый в барабанной гелиосушилке, является важным технологическим преимуществом перед высокотемпературными сушилками.

Глава 6 Результаты экспериментальных исследований

6.1 Климатические условия экспериментальных исследований

Характеристика климатических условий приведена на основе обзора погодного мониторинга (агрометеорологический бюллетень) агрометеорологической станции и лаборатории по контролю параметров окружающей среды по декадам месяца (лицензия метеорологической станции Брянского ГАУ серии Б № 1690817).

Наблюдения были проведены за все декады июля и августа 2013-2015 годов. Географические координаты расположения метеостанции и испытуемой гелиосушки от нулевого меридиана обсерватории Гринвич: $53^{\circ}26'$ северной широты и $34^{\circ}08'$ восточной долготы (по Гринвичу). Относительно уровня Балтийского моря высота составляет 187,98 м.

Значения суточной суммарной солнечной радиации в июле и августе 2013-2015 годов представлены на рис. 6.1-6.2.

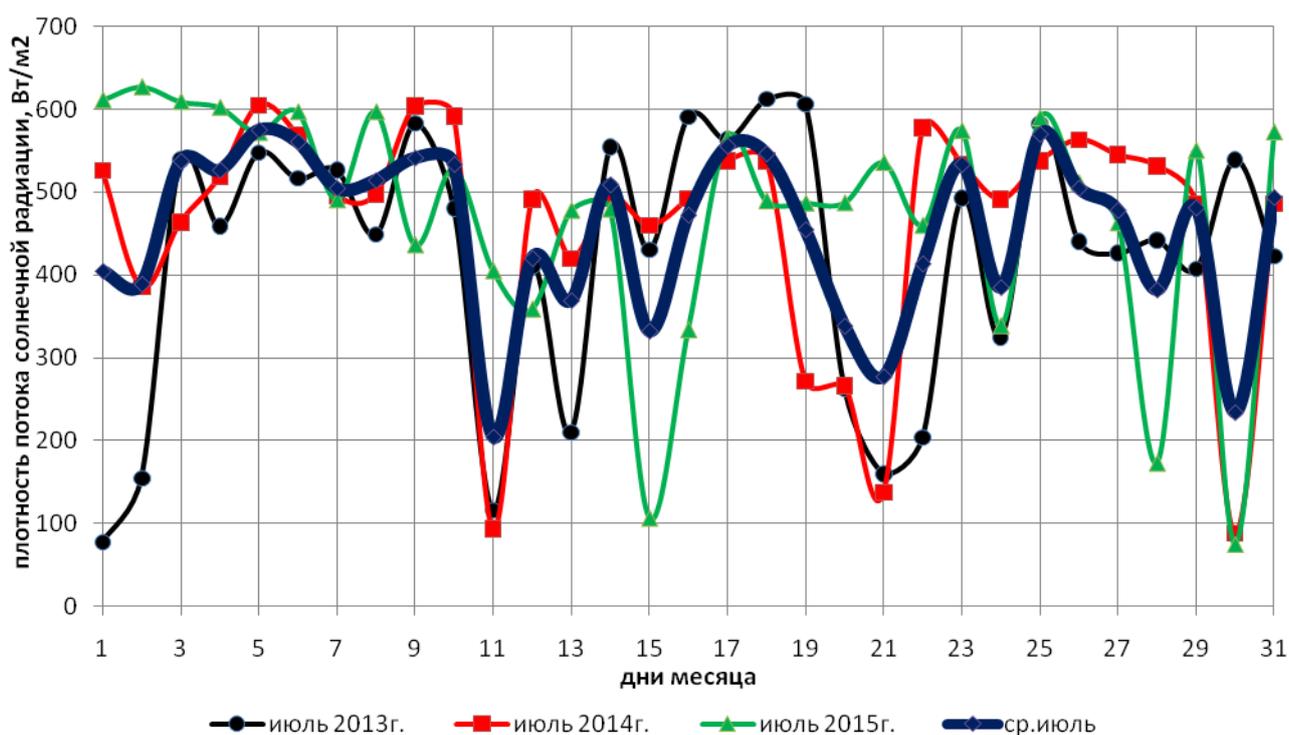


Рисунок 6.1 - Максимальная дневная суммарная солнечная радиация в июле месяце на наклонную поверхность 2013-2015 г.г.

Суммарная солнечная радиация изменяется в зависимости от облачности и влажности атмосферных фронтов и выражается в $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Ниже приведены основные показатели метеорологического мониторинга территории УНПМТОИС Брянского ГАУ, на которой проводились экспериментальные исследования в период 2013-2015 годов.

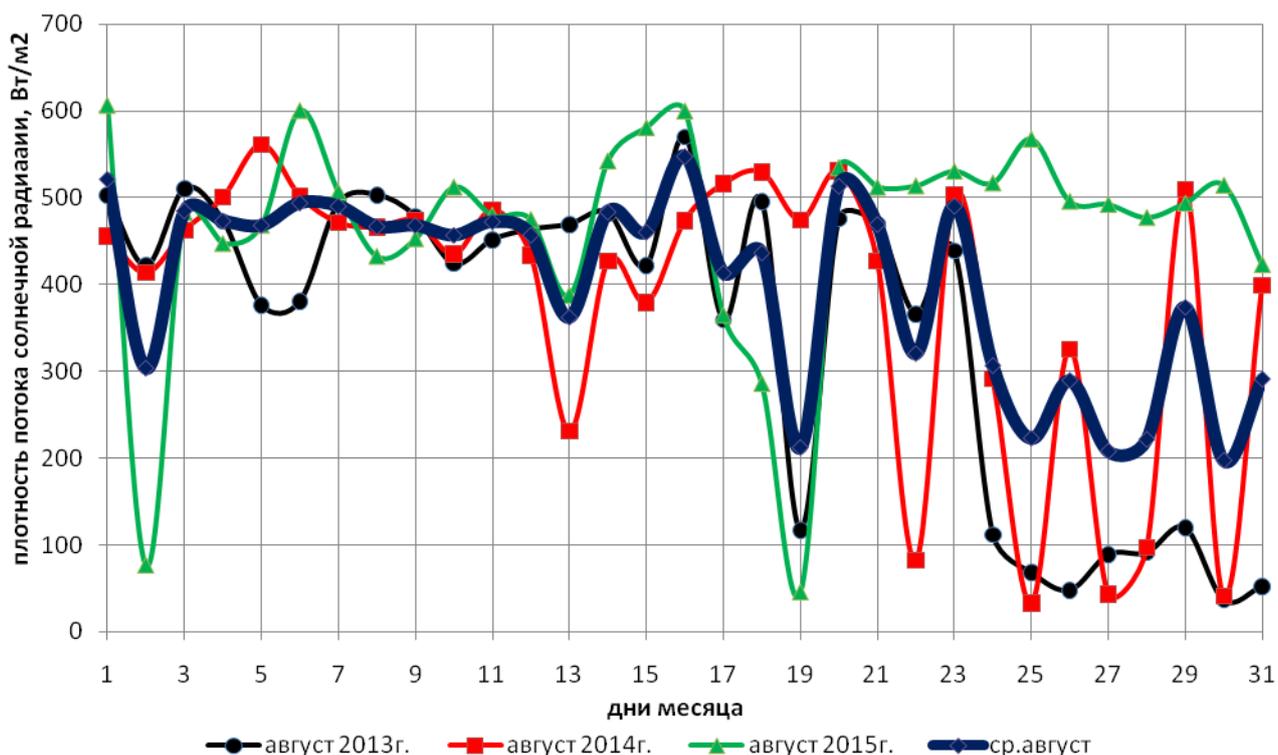


Рисунок 6.2 - Максимальная дневная суммарная солнечная радиация в августе месяце на наклонную поверхность 2013-2015 г.г.

Июль 2013 года был теплый, но в то же время пасмурный. Температура воздуха была незначительно выше нормы и составила $+19\text{ }^{\circ}\text{C}$ при месячной норме $+18,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. В среднем максимальные температуры июля 2013 года доходили до $+24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Атмосферных осадков выпало в пределах нормы - $82,4\text{ мм}$ при норме июля 82 мм . При этом солнечных дней в этом месяце было 13. Средняя влажность воздуха равнялась 84% , что немного превышало норму в 82% . Адекватно влажности воздуха и облачности в данный месяц изменялось давление. Среднее атмосферное давление за июль 2013 года равнялось $99,5\text{ кПа}$ (746 мм рт.ст.). Согласно атмосферному давлению изменялась и скорость ветра у поверхности земли. Средняя скорость ветра составляла 3 м/с при норме в $4,4\text{ м/с}$. Преимущественно преобладали С (северные) и СЗ (северо-западные) ветра.

Август 2013 года был теплый. Температура воздуха была выше нормы и составила $+18,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ при месячной норме $+17\text{ }^{\circ}\text{C}$. В среднем максимальные температуры доходили до $+24,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Атмосферных осадков выпало ниже нормы - $51,6\text{ мм}$ при норме августа 64 мм . При этом солнечных дней в этом месяце было 17. Средняя влажность воздуха равнялась 79% , что немного превышало норму в 76% . Адекватно влажности воздуха и облачности в данный месяц изменялось давление. Среднее атмосферное давление за август 2013 года равнялось $99,6\text{ кПа}$ (747 мм рт.ст.). Согласно атмосферному давлению изменялась и скорость ветра у поверхности земли. Средняя скорость ветра была значительно ниже нормы и составляла $1,8\text{ м/с}$ при норме в $4,1\text{ м/с}$. Преимущественно преобладали Ю, ЮВ и СВ ветра.

Июль 2014 года был жаркий. Температура воздуха была выше нормы и со-

ставила +21,2 °С при месячной норме +18,4 °С. В среднем максимальные температуры доходили до +28 °С. Атмосферных осадков выпало меньше нормы – 61,6 мм при норме июля 82 мм. При этом солнечных дней было 19. Средняя влажность воздуха равнялась 73,9%, что было значительно ниже нормы в 82%. Адекватно влажности воздуха и облачности в данный месяц изменялось давление. Среднее атмосферное давление за июль 2014 года равнялось 99,7 кПа (748 мм рт.ст.). Согласно атмосферному давлению изменялась и скорость ветра у поверхности земли. Средняя скорость ветра для данного месяца была в норме и составляла 4 м/с при норме в 4,4 м/с. Преимущественно преобладали В и СВ ветра.

Август 2014 года был жаркий. Температура воздуха года была немного выше нормы и составила +19,7 °С при месячной норме +17 °С. В среднем максимальные температуры доходили до +27,1 °С. Атмосферных осадков выпало вдвое ниже нормы – 31,6 мм при норме августа 64 мм. При этом солнечных дней в этом месяце было 23. Средняя влажность воздуха равнялась 74,3 %, что немного ниже нормы в 76%. Адекватно влажности воздуха и облачности в данный месяц изменялось давление. Среднее атмосферное давление за август 2014 года равнялось 99,3 кПа (745 мм рт.ст.). Согласно атмосферному давлению изменялась и скорость ветра у поверхности земли. Средняя скорость ветра была значительно ниже нормы и составляла 2,7 м/с при норме в 4,1 м/с. Преимущественно преобладали Ю, ЮВ и СВ ветра.

Июль 2015 года был теплый, но с переменной облачностью. Температура воздуха была незначительно выше нормы и составила +19 °С при месячной норме +18,4°С. В среднем максимальные температуры доходили до +27,1 °С. Атмосферных осадков выпало больше нормы – 89,9 мм при норме июля 82 мм. При этом солнечных дней было 12. Однако средняя влажность воздуха равнялась 70,7%, что было значительно ниже нормы в 82%. Адекватно влажности воздуха и облачности в данный месяц изменялось давление. Среднее атмосферное давление за июль 2015 года равнялось 99,2 кПа (744 мм рт.ст.). Согласно атмосферному давлению изменялась и скорость ветра у поверхности земли. Средняя скорость ветра для данного месяца была ниже нормы и составляла 3,3 м/с при норме в 4,4 м/с. Преимущественно преобладали ЮЗ и СЗ ветра.

Август 2015 года был теплый и безоблачный. Температура воздуха года была немного выше нормы и составила +19,4 °С при месячной норме +17 °С. В среднем максимальные температуры доходили до +26,2°С. Атмосферных осадков практически не выпадало – 5,6 мм. Норма же для августа 64 мм. При этом солнечных дней в этом месяце было 27. Средняя влажность воздуха равнялась 57%, что намного ниже нормы в 76%. Адекватно влажности воздуха и облачности в данный месяц изменялось давление. Среднее атмосферное давление за август 2015 года равнялось 100,2 кПа (745 мм рт.ст.), что выше нормы. Согласно атмосферному давлению изменялась и скорость ветра у поверхности земли. Средняя скорость ветра была значительно ниже нормы и составляла 1,8 м/с при норме в 4,1 м/с. Преимущественно преобладали СВ ветра.

В целом погодные условия были благоприятны для уборки зерновых и работы гелиосушки, за исключением июля 2013, 2015 годов. В данные месяцы зерновая масса имела повышенную влажность и требовала более интенсивной сушки.

6.2 Показатели зерновой массы как объекта сушки

В процессе послеуборочного дозревания продолжается активное дыхание зерна, а выделяющаяся при этом влага увеличивает процент влажности зерновой массы (табл. 6.1).

Таблица 6.1 - Состояние влажности семян различных культур [28]

Культура	Относительная влажность зерна, %			
	сухое	средней сухости	влажное	сырое
Зерновые: - пшеница, ячмень, рожь - кукуруза (зерно), овес	...14,0	14,0...15,5 14,0...16,0	15,7...17,0 16,0...18,0	свыше 17,0 ...18,0
Зернобобовые: - горох, люпин, соя - фасоль	...14,0 ...16,0	14,0...16,0 16,0...18,0	16,0...18,0 18,0...20,0	...18,0 ...20,0

Исследования были проведены на базе УНПМТОИС Брянского ГАУ, а проверка партий зерна в Брянском филиале ФГУ «Госсорткомиссия».

Для проведения экспериментальных исследований использовалось зерно ржи сорта Зубровка. Зерно данной культуры имеет слегка продолговатую форму зерновки с продольной ложбинкой по центру и отличается от стандарта маленьким размером. Средняя площадь геометрической поверхности зерновки равна 56,07 мм², а объем зерновки – 22,89 мм³.

Насыпная плотность зерна зависит от влажности и в сухом состоянии составляет 740 кг/м³, что выше стандарта. Это обусловлено маленьким размером зерновки. Из этого следует, что кроме влажности на насыпную плотность оказывает влияние анатомическое строение зерна. У данного сорта ржи скважность составляет 26 %.

Исследуемый сорт зерна имел различную начальную влажность и температуру зерна около 25 °С. Масса 1000 зерен составляет 34,5 г (стандарт 29...32,7 г). Увеличение влажности и засоренности зерновой массы ведет к снижению сыпучести, а угол естественного откоса при этом увеличивается. Угол естественного откоса в данном случае составил 16°, угол трения по стали - 19°.

Коэффициенты внешнего трения также зависят от скорости скольжения и влажности. Коэффициент трения покоя зерна ржи при влажности 20...25 % по стали составляет 0,430. В сухом же состоянии данный сорт имеет коэффициент трения покоя 0,287, а коэффициент трения движения составляет 0,436. Коэффициент внутреннего трения равен коэффициенту трения покоя.

Экспериментальные исследования были проведены на зерне с разными качественными показателями и различной степенью засоренности. Зерновая масса взята непосредственно из производственных условий.

Проверка работоспособности экспериментальной гелиосушки при работе с засоренным зерном показала, что наблюдалось незначительное увеличение его конечной влажности и температуры на выходе из зоны сушки.

Основные показатели качества зерна ржи, использованной в ходе исследований, представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 - Показатели качества ржи

Наименование показателя	Стандартные	Фактические
Натура, г/л	670,0-735,0	736,5
Число падения, сек	141,0-200,0 2 кл. (продовольств.)	161,7
Сорная примесь, %	не более 2,0	1,5
Зерновая примесь, %	не более 5,0	1,1
Стекловидность, %		39,9
Количество проросших зерен, %	не более 3,0	0,1
Засоренность вредителями	не допускается, кроме зараженности клещами не выше второй степени	выборочная зараженность клещами первой степени

В результате сушки зерна должна быть обеспечена его жизнеспособность, увеличена стойкость при хранении, выровнена влажность зерновой массы, улучшены технологические качества зерна и сохранена его всхожесть [47, 52].

После сушки было пророщено 4 партии ржи по 100 семян в каждой. В процессе данных исследований была выявлена средняя для всех партий энергия прорастания, которая составила 79 %. Также установлено количество проросших и не проросших семян. Все они разделены на 5 групп, результаты приведены в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Результаты проращивания высушенной ржи

Наименование группы	Среднее количество семян в группе, %
Нормально проросшие	70
Ненормально проросшие	6
Набухшие	14
Загнившие	3
Не проросшие	7

Из таблицы 6.3 видно, что количество не проросших семян равно 7 %, а ненормально проросших – 6 %, что соответствует нормативным требованиям [43].

6.3 Описание экспериментальной барабанной гелиосушилки зерна с системами активной вентиляции и электроподогрева сушильного агента

На базе учебной научно-производственной машинно-технологической опытно-испытательной станции (УНПМТОИС) Брянского ГАУ было произведено дооборудование барабанной гелиосушилки зерна водяным аккумулятором теплоты и системами интенсификации процесса сушки.

Водяной аккумулятор теплоты [17] состоит из металлического резервуара емкостью 300 литров, окрашенного в черный цвет, датчиков контроля температуры воды и расширительного бака (рис. 6.3).



Рисунок 6.3 – Водяной аккумулятор теплоты

Стенка водяного аккумулятора теплоты, обращенная к солнечному коллектору, является тепловоспринимающей поверхностью водяного аккумулятора.

Система вентиляции в виде вытяжного вентилятора (рис. 6.4) и датчика скорости потока воздуха SF/C-R (рис. 6.5) установлена в верхней части канала вытяжной трубы. В дополнительном канале вытяжной трубы установлен датчик скорости потока воздуха для устранения влияния работы вентилятора на его срабатывание и обеспечивает включение системы при слабой естественной тяге.



а



б

Рисунок 6.4 – Вытяжной вентилятор системы активной вентиляции:
а) вид спереди; б) вид сбоку



Рисунок 6.5 – Датчик контроля потока воздуха системы активной вентиляции

Система подогрева сушильного агента устанавливается в сушильной камере под сушильным барабаном, и представляет собой трубчатый электронагреватель установленной мощности (рис. 6.6).



Рисунок 6.6 – Система электроподогрева сушильного агента:
а) вид спереди; б) вид сбоку

Данная система также может быть использована для сушки зерна при неблагоприятных погодных условиях. В таком случае снижение температуры сушильного агента на выходе из нижнего гелиоколлектора до заданной является управляющим сигналом для включения системы.

6.4 Результаты сравнительного испытания водяного и гравийного аккумуляторов теплоты барабанной гелиосушилки

Емкость водяного аккумулятора теплоты определяется по формуле (3.4) из условия накопления того же количества теплоты, что в заменяемом гравийном аккумуляторе.

По данным [116] при массе гравийного аккумулятора 3000 кг, удельной теплоемкости гравия 630 Дж/(кг·°С), начальной температуре гравия 19 °С, конечной температуре нагрева гравийного аккумулятора 31 °С, начальной температуре водяного аккумулятора 28 °С, конечной температуре нагрева водяного аккумулятора 46 °С требуемая масса воды составит 300 кг. Принимая плотность воды равной 1000 кг/м³, получим вместимость водяного аккумулятора теплоты равную 300 л.

На рис. 6.7 и 6.8 представлены результаты испытаний гравийного и водяного аккумуляторов теплоты в дневное и ночное время суток.

Анализ рисунка 6.7 показывает, что водяной аккумулятор теплоты в ночное время более интенсивно отдает теплоту и, в отличие от гравийного аккумулятора, с 8 часов утра начинается его очередная зарядка.

В дневное время (рис. 6.8) водяной аккумулятор теплоты более интенсивно накапливает теплоту, нагревается до более высокой температуры и с 15.00 часов, как и гравийный, начинает разряжаться.

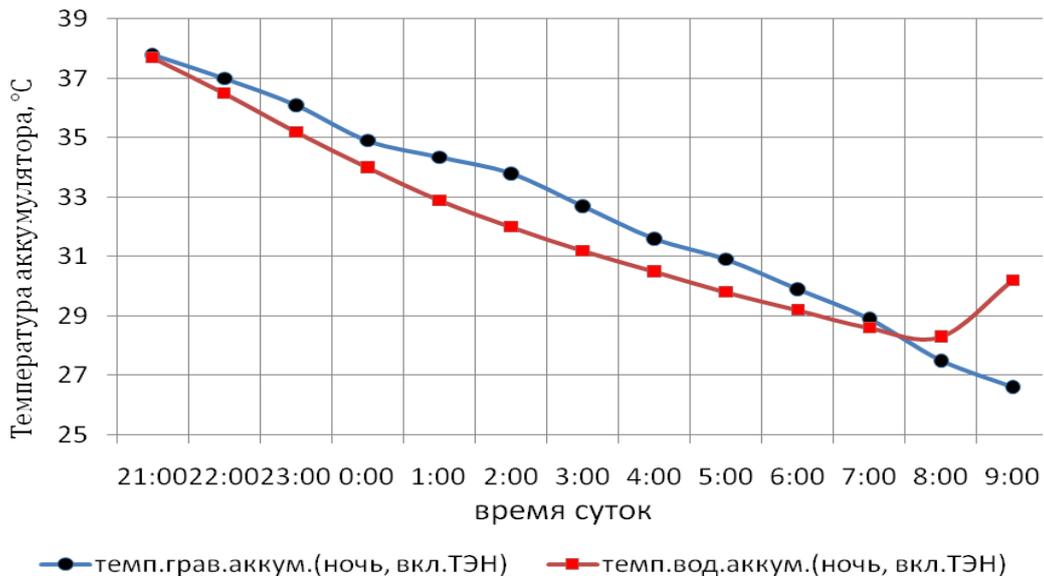


Рисунок 6.7 – Изменение температуры гравийного и водяного аккумуляторов теплоты в ночное время суток

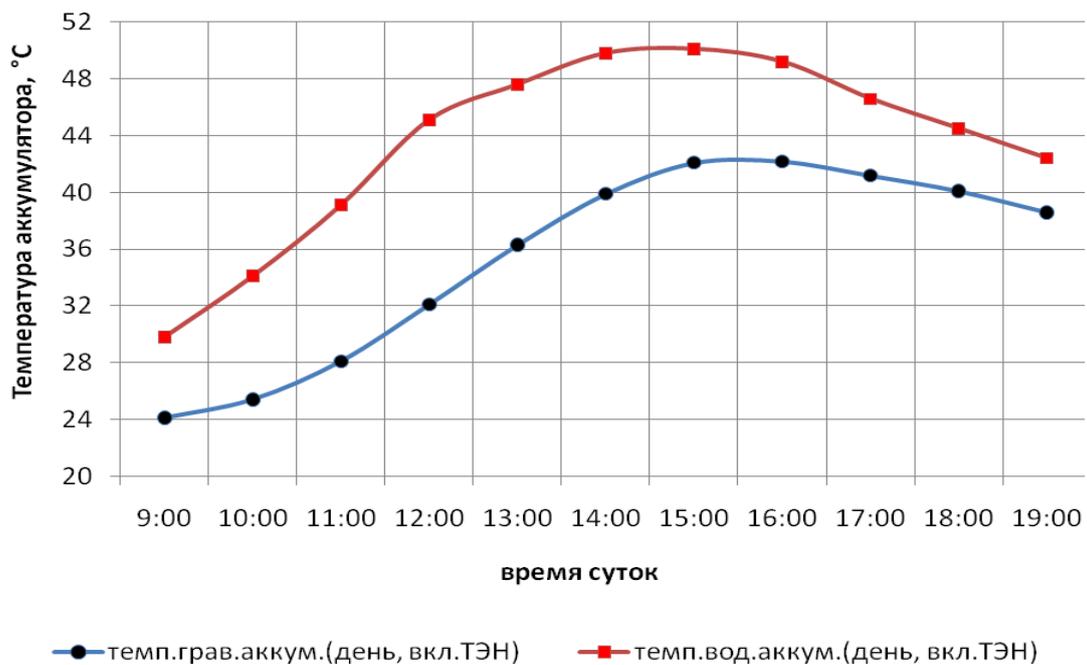


Рисунок 6.8 – Изменение температуры гравийного и водяного аккумуляторов теплоты в дневное время суток

Таким образом, водяной аккумулятор теплоты позволяет уменьшить материалоемкость сушилки, сделать сушилку мобильной, а также интенсифицировать процесс сушки за счет более высоких температур нагрева и теплоотдачи. Также снижается гидравлическое сопротивление нижнего солнечного коллектора вследствие отсутствия необходимости прохождения сушильного агента через слой гравия.

Под действием солнечной энергии металлическая тепловоспринимающая поверхность водяного аккумулятора теплоты быстро нагревается, что обеспечивает более высокую температуру его поверхности относительно гравийного. Вследствие этого сушильный агент сильнее нагревается, т.к. контактирует с более горячей поверхностью аккумулятора. Это обеспечивает более высокую температуру в сушильной камере (рис. 6.9).

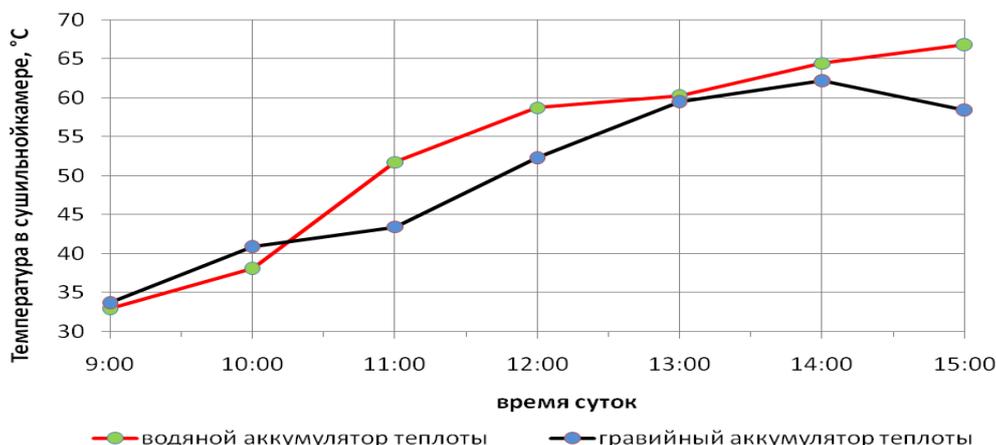


Рисунок 6.9 – Зависимость температуры в сушильной камере от типа аккумулятора теплоты

По результатам экспериментальных данных получена регрессионная зависимость (рис. 6.10) температуры сушильного агента на входе в сушильную камеру от температуры тепловоспринимающей поверхности водяного аккумулятора теплоты

$$T_1 = 0,913T_{ст.а} - 6,953. \quad (6.1)$$

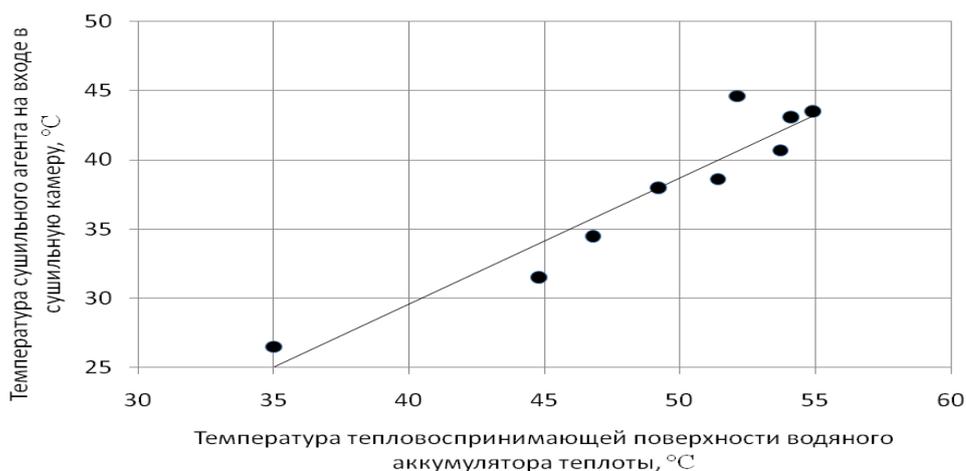


Рисунок 6.10 – Зависимость температуры сушильного агента на входе в сушильную камеру от температуры тепловоспринимающей поверхности водяного аккумулятора теплоты

Для данной регрессионной модели коэффициент корреляции исходных данных $R=0,947$, коэффициент детерминации $R^2=0,897$, F -критерий равен 61,44 на уровне $p = 0,05$. Табличное значение F - критерия равно 5,59, что свидетельствует об адекватности полученной модели. Проверка доверительных интервалов коэффициентов регрессии по t - критерию подтвердила их достоверность.

Температура воды в аккумуляторе теплоты также находится в прямой зависимости от температуры его тепловоспринимающей поверхности (рис. 6.11). На основании экспериментальных данных получена соответствующая регрессионная зависимость

$$T_{\text{в}} = 0,963T_{\text{ст.а}} - 0,285. \quad (6.2)$$

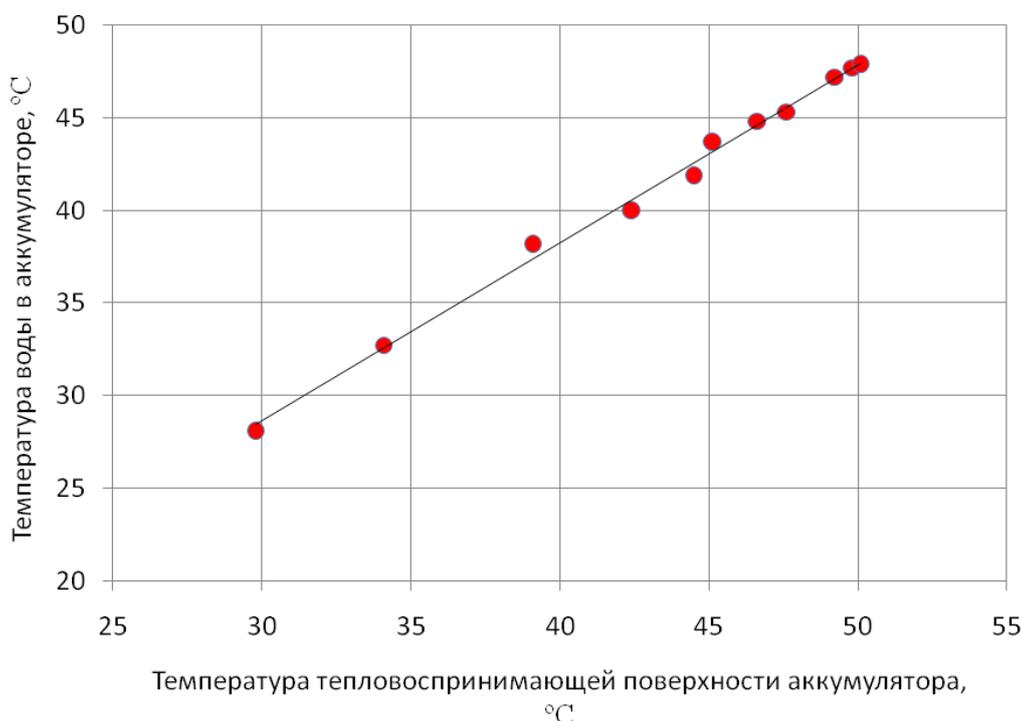


Рисунок 6.11 – Зависимость температуры воды в аккумуляторе от температуры его тепловоспринимающей поверхности

Для данной регрессионной модели коэффициент корреляции исходных данных $R=0,997$, коэффициент детерминации $R^2=0,995$, F - критерий равен 1858,9 на уровне $p = 0,05$. Табличное значение F - критерия равно 240,0, что свидетельствует об адекватности полученной модели. Проверка доверительных интервалов коэффициентов регрессии по t - критерию подтвердила их достоверность.

Изменение температуры тепловоспринимающей поверхности в процессе сушки в дневное время представлено на рис. 6.12.

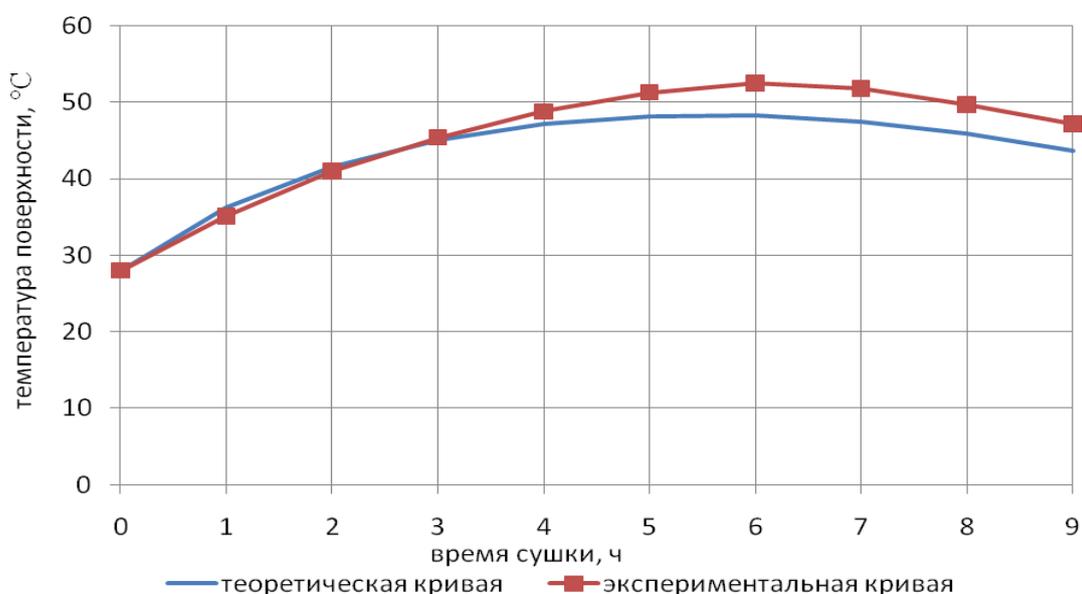


Рисунок 6.12 – Изменение температуры тепловоспринимающей поверхности в процессе сушки в дневное время

Сравнение экспериментальной и теоретической кривой, построенной по выражению (3.34), свидетельствует об адекватности описания предложенной математической моделью реального процесса нагрева тепловоспринимающей поверхности.

6.5 Обоснование параметров систем электроподогрева и активной вентиляции сушильного агента барабанной гелиосушилки

Система электроподогрева сушильного агента в виде трубчатого электронагревателя устанавливается в сушильной камере под барабаном и обеспечивает интенсивный подогрев сушильного агента вначале процесса сушки.

Данная система также может быть использована для сушки зерна при неблагоприятных погодных условиях. В таком случае сигналом для включения системы является снижение до заданного значения температуры сушильного агента на выходе из нижнего коллектора.

В результате проведенных исследований установлено, что максимальная скорость прогрева зерна на первом этапе сушки достигается при режиме с постоянно включенным ТЭНом (рис. 6.13). Это объясняется тем, что в начале сушки в утренние часы (с 9.00 ч) солнечная активность невысока, поэтому сушильному агенту необходим дополнительный подогрев (рис. 6.14).

Зависимость температуры окружающей среды от солнечной активности описывается уравнением регрессии:

$$T_{o,c} = 0,049q_{c,z} + 15,84. \quad (6.3)$$

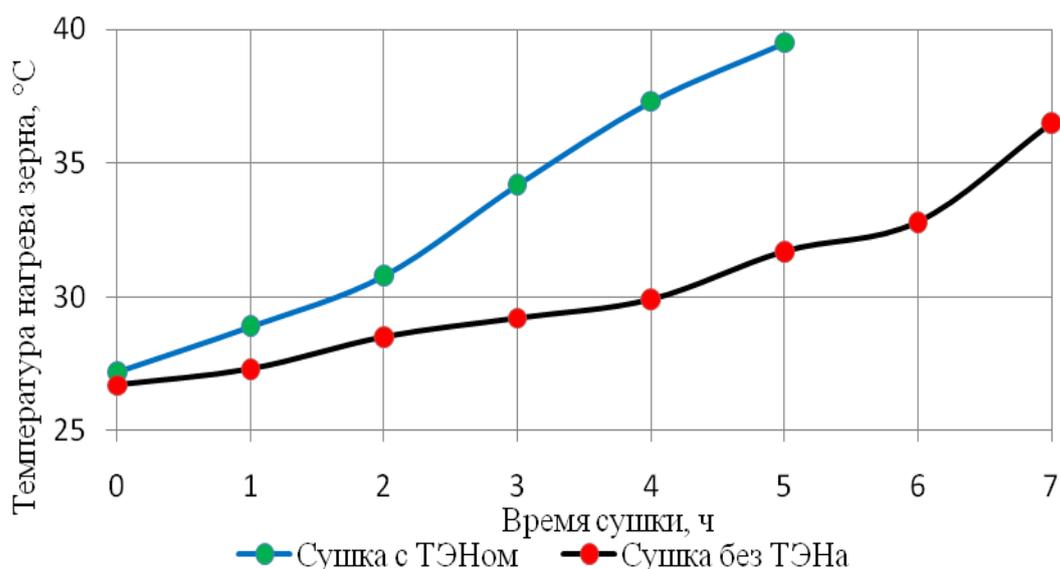


Рисунок 6.13 – Изменение температуры нагрева зерна от времени сушки и наличия электроподогрева сушильного агента

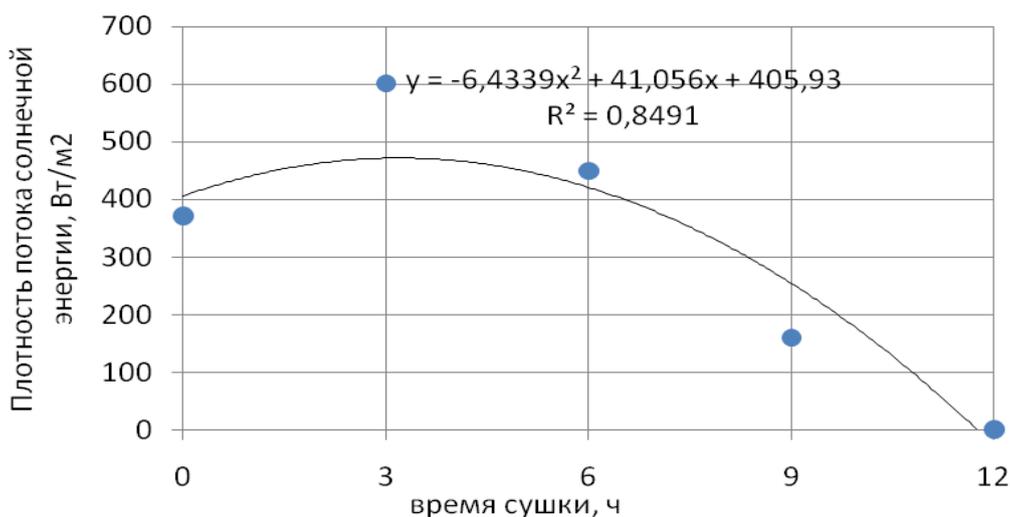


Рисунок 6.14 – Зависимость плотности потока солнечной энергии от времени сушки (с 9.00 ч)

Для оценки адекватности выражения (3.43) на основании экспериментальных данных из выражения (3.37) было определено численное значение коэффициента теплообмена равное 50 Вт/°С.

Построенная на основании выражения (3.43) теоретическая зависимость температуры нагрева зерна в процессе сушки практически совпала с экспериментальной кривой, что свидетельствует от адекватности данного выражения (рис. 6.15).

Исследования показали целесообразность постоянной работы системы электроподогрева сушильного агента в течение процесса сушки. Вначале дополнительный подогрев обеспечивает ускорение прогрета зерна и начала второго этапа сушки. Затем электроподогрев компенсирует колебания солнечной

активности при облачной погоде, а также ее снижение в после полуденное время суток.

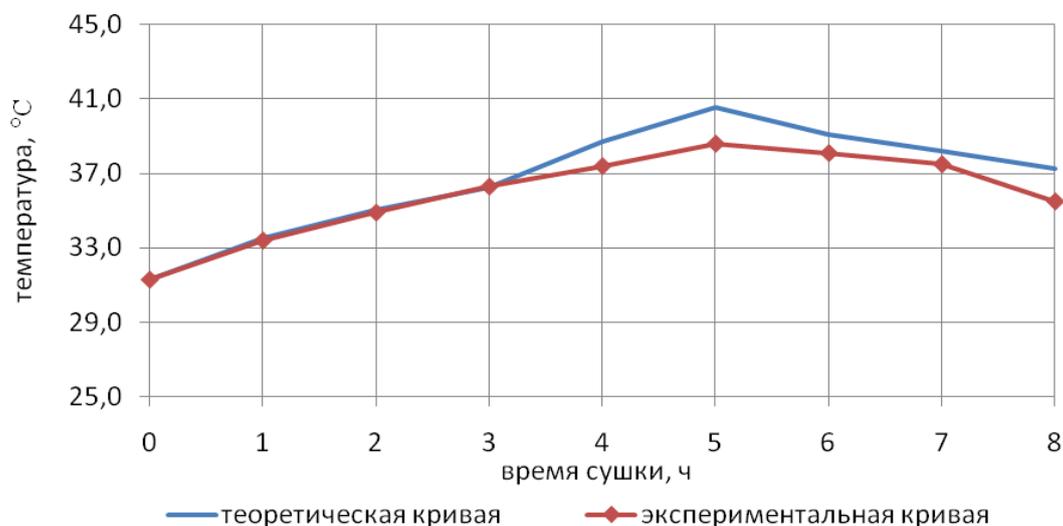


Рисунок 6.15 – Изменение температуры зерна в процессе сушки

На рис. 6.16 представлены кривые сушки без и с использованием систем электроподогрева (замеры через каждый час).

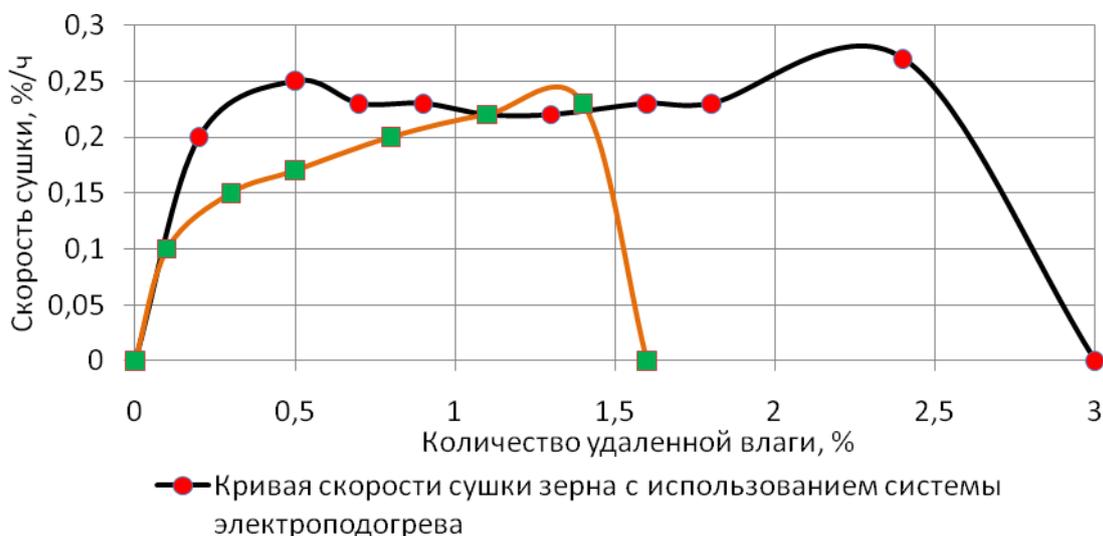


Рисунок 6.16 – Кривая скорости сушки с использованием и без использования системы электроподогрева

Использование электроподогрева сушильного агента позволяет уже в первый час сушки увеличить ее скорость вдвое и поддерживать на достигнутом уровне.

При сушке в ночное время постоянная работа системы электроподогрева сушильного агента также оказывает положительное влияние на процесс сушки (рис. 6.17-6.18).

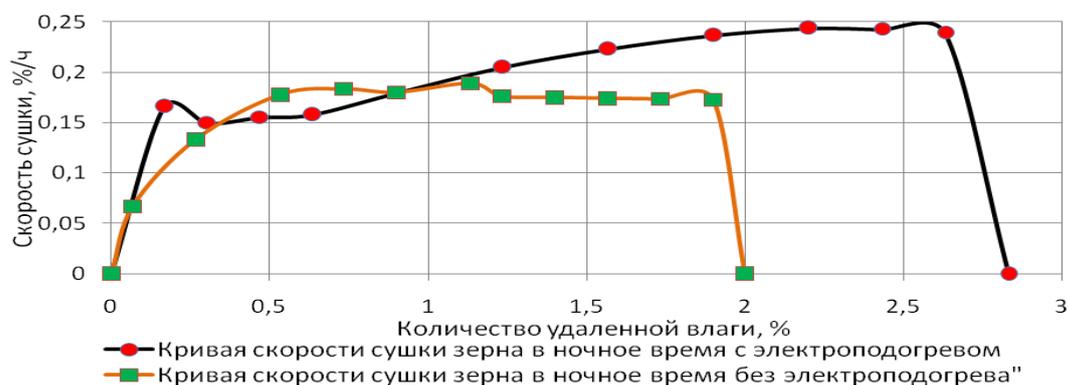


Рисунок 6.17 – Кривая скорости сушки в ночное время с использованием и без использования системы электроподогрева

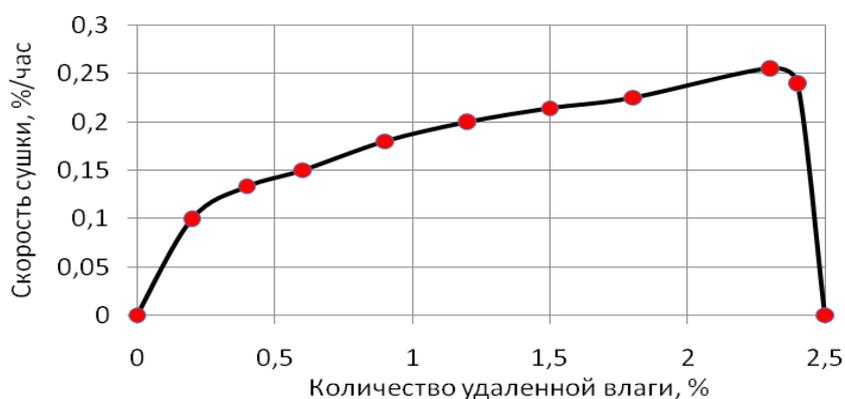


Рисунок 6.18 – Кривая сушки зерна в ночное время с электроподогревом

Скорость сушки имеет тенденцию к росту при стабилизации на достигнутом уровне вплоть до окончания процесса сушки. Зерно быстрее прогревается и затем его температура поддерживается на постоянном уровне до окончания процесса сушки (рис. 6.19).

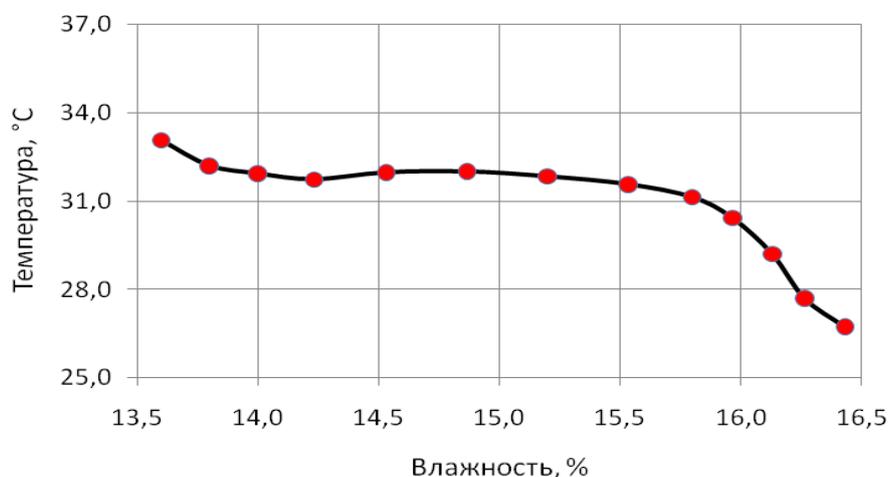


Рисунок 6.19 – Зависимость температуры зерна от его влажности при сушке в ночное время с электроподогревом

Определим требуемую мощность ТЭНа системы электроподогрева сушильного агента по формуле (3.11):

$$P = k_3 L_T (T_2 - T_1) \left(c_{c.a} + \frac{k_{п} F_{c.к}}{V_k} \right) =$$

$$= 1,1 \cdot 0,19 \cdot (45 - 37) \left(1290 + 0,51 \cdot \frac{23,58}{6,27} \right) = 2,16 \text{ кВт.}$$

Система активной вентиляции в виде вытяжного вентилятора с заслонкой и датчика скорости потока воздуха, установлена в канале в верхней части вытяжной трубы, что увеличивает расход агента сушилки и, тем самым, повышает интенсивность влагообмена.

Если скорость воздушного потока в вытяжной трубе уменьшится, и она станет ниже установленной, датчик скорости потока воздуха, находящийся в канале контроля скорости вытяжной трубы, включит систему активной вентиляции, которая увеличит расход сушильного агента.

При неблагоприятных погодных условиях данная система обеспечивает активную вентиляцию зерна, что предотвращает его самосогревание до наступления благоприятных погодных условий.

На рис. 6.20 показана разница скорости движения сушильного агента с системой активной вентиляции и без нее.

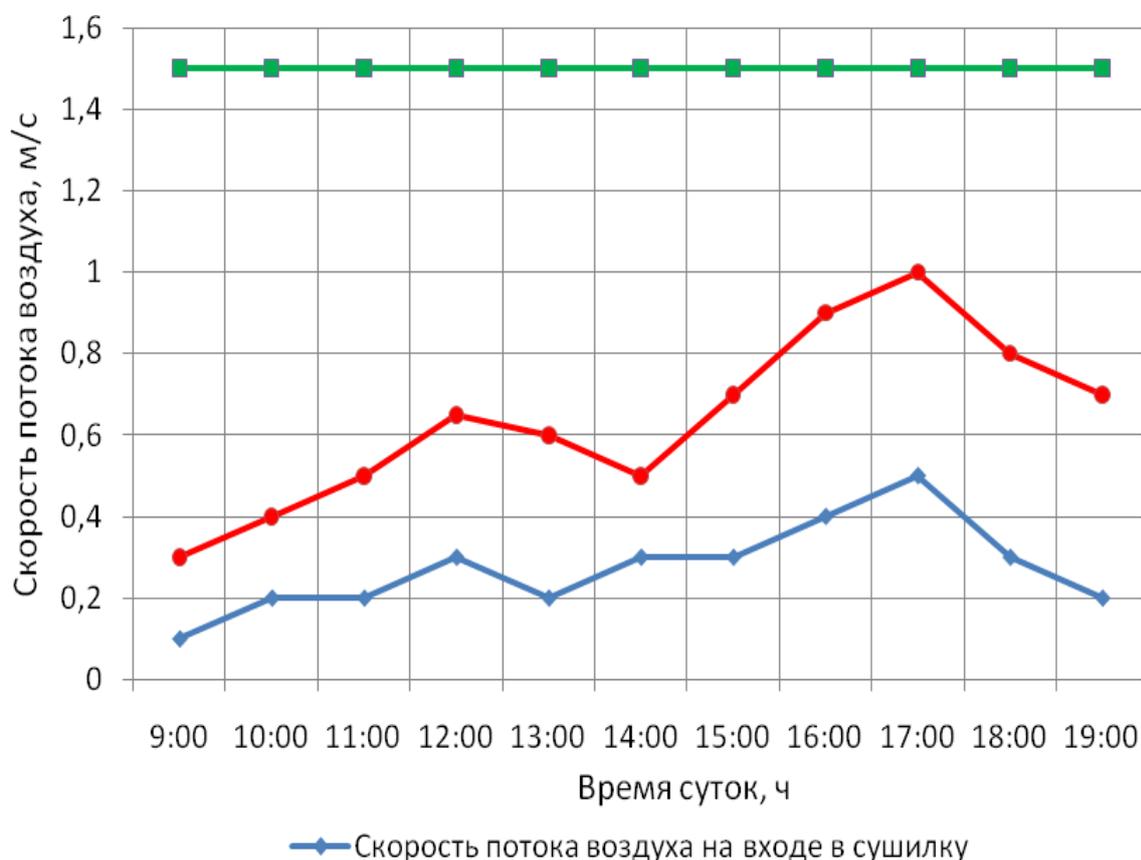
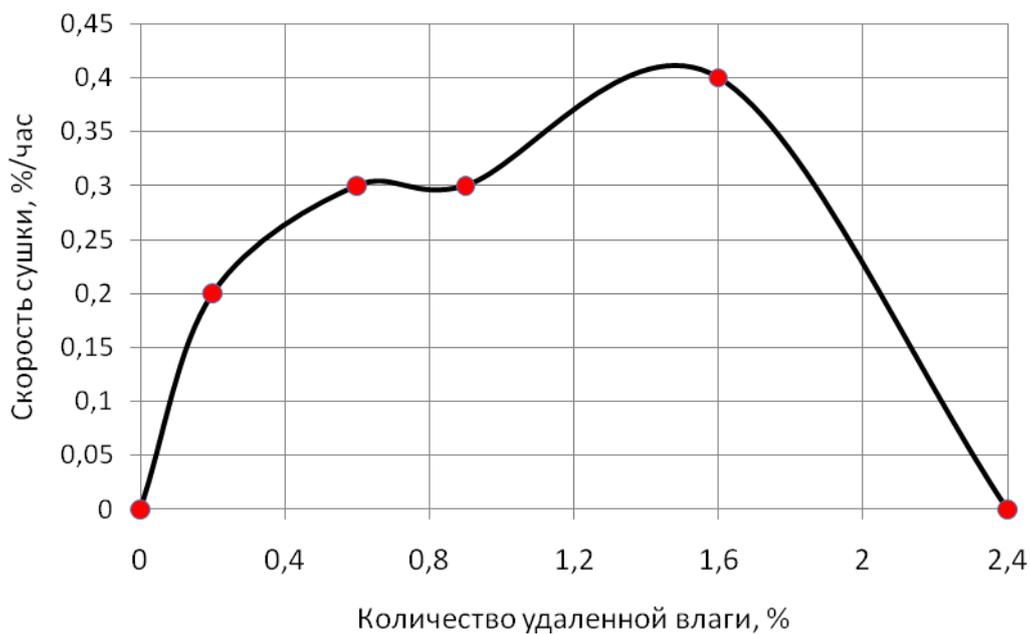
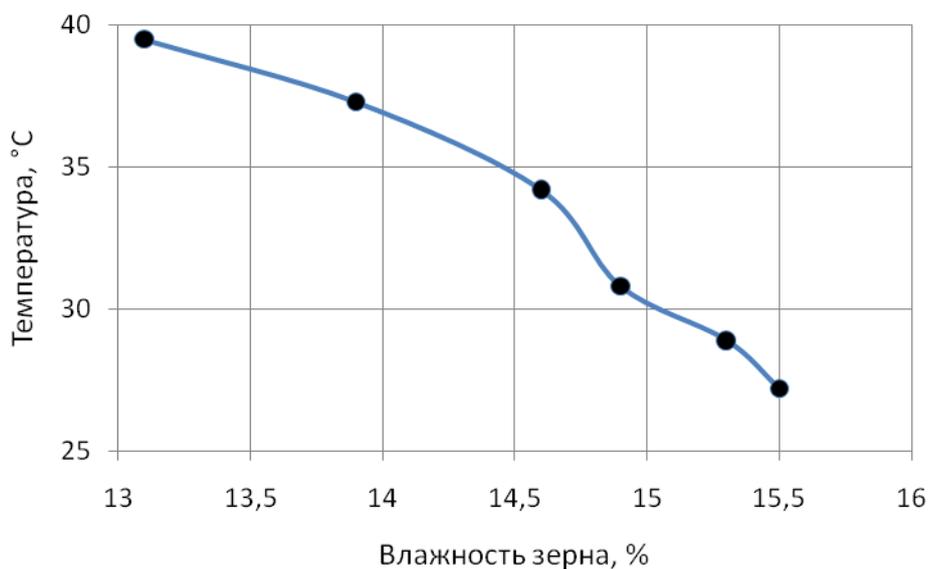


Рисунок 6.20 – Изменение скорости движения потока воздуха

Причем вентилятор целесообразно включать во второй стадии сушки после прогрева зерна, чтобы не снижать температуру сушильного агента на входе в сушильный барабан и, тем самым, не замедлять прогрев зерна (рис. 6.21).



а



б

Рисунок 6.21 – Кривая скорости сушки (а) и температурная кривая (б) с постоянно включенным ТЭНом и вентилятором, включенным после разогрева зерна (через 3 часа)

Работа системы активной вентиляции с начала процесса сушки (рис. 6.22) обеспечивает в первый час равную скорость сушки с вариантом использования только системы электроподогрева (см. рис. 6.16), однако затем из-за

снижения скорости прогрева зерна вследствие невысокой температуры сушильного агента она практически не растет, как и в случае использования только электроподогрева.

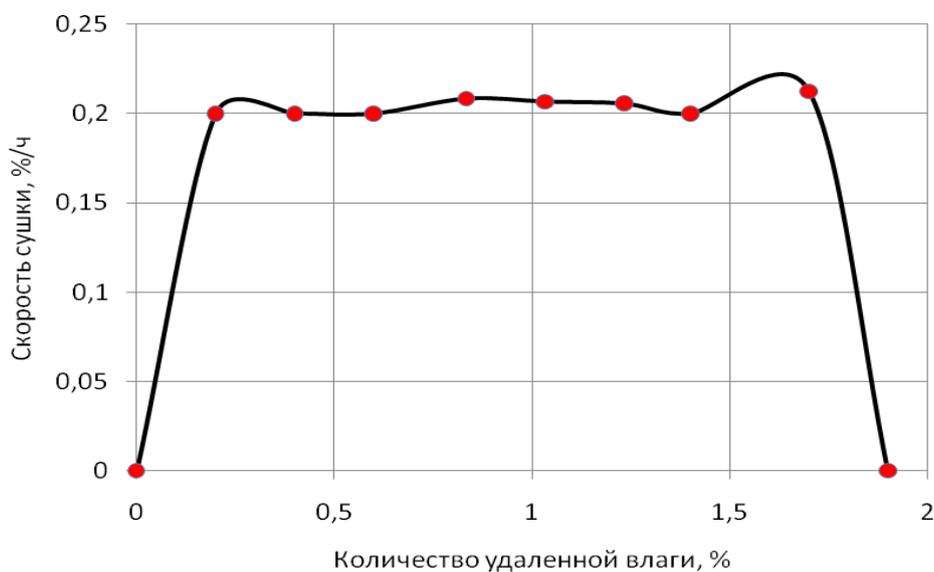


Рисунок 6.22 – Кривая скорости сушки при включенной системе активной вентиляции без электроподогрева

При работе обеих систем с начала процесса сушки скорость сушки в течение первых трех часов имеет тенденцию к росту (рис. 6.23-6.24). Затем из-за меньшего прогрева зерна вследствие активной вентиляции скорость сушки падает и только после его прогрева до 37 °С при отключенном вентиляторе повторное включение вентиляции обеспечивает увеличение скорости сушки при отсутствии перегрева зерна выше 40 °С.



Рисунок 6.23 – Кривая скорости сушки при включенных системах активной вентиляции и электроподогрева (с 4 по 6 точки замера от нулевой вентилятор отключен)

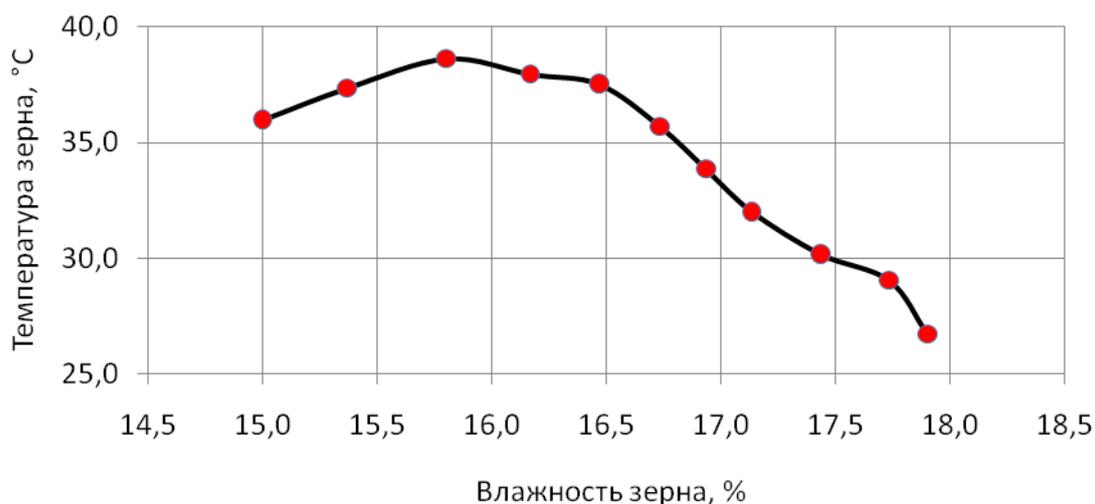


Рисунок 6.24 – Температурная кривая при включенных системах активной вентиляции и электроподогрева (с 4 по 6 точки замера от нулевой ветиллятор отключен)

Из рис. 6.21 видно, что интенсивное удаление влаги началось после трех часов сушки (замер показаний проводился каждый час), а именно, после включения вентилятора. Скорость сушки при таком режиме оказалась значительно выше, чем при сушке без использования систем электроподогрева и активной вентиляции (см. рис. 6.16).

Данные рис. 6.25 – 6.26 также свидетельствуют о том, что через 3 часа от начала сушки в ясную погоду при работе системы электроподогрева достигается температура зерна порядка 34 °C, при которой необходимо включение системы активной вентиляции.

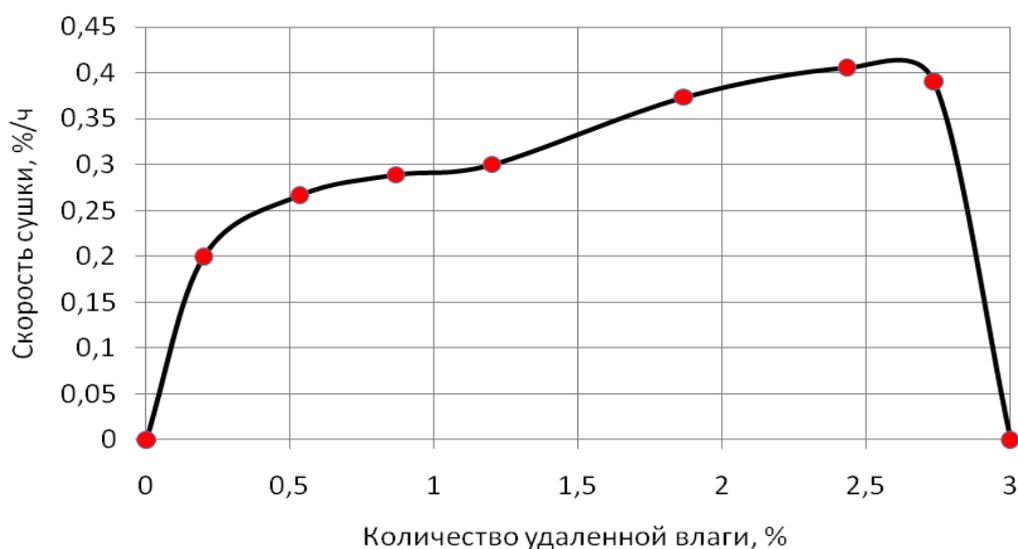
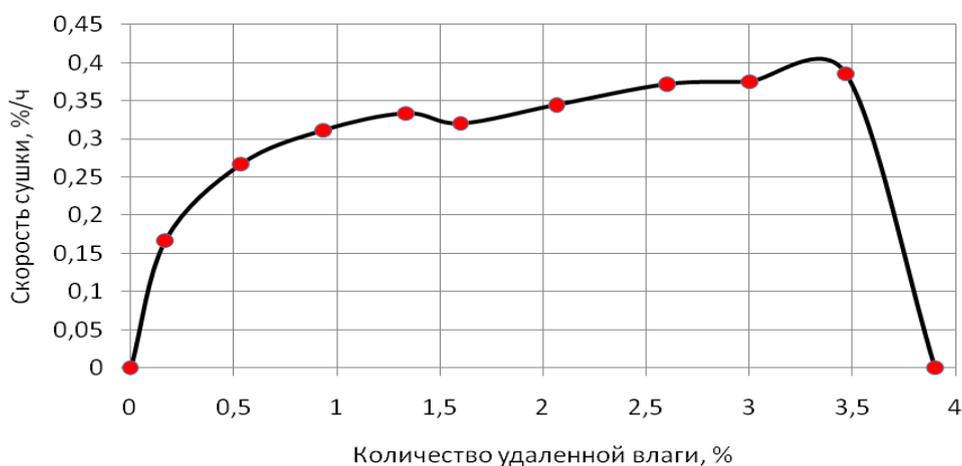


Рисунок 6.25 – Кривая скорости сушки при включенной системе электроподогрева (активная вентиляция включена после 4 ч сушки)

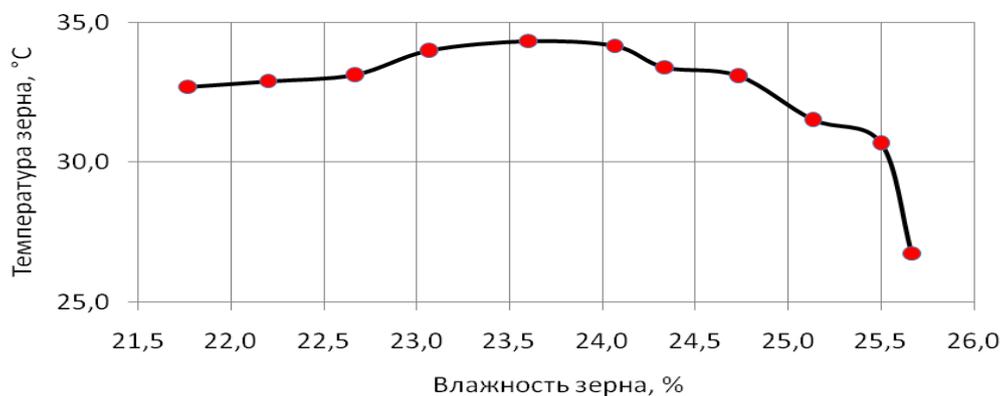


Рисунок 6.26 – Температурная кривая сушки при включенной системе электроподогрева (активная вентиляция включена после 4 ч сушки)

В облачную (рис. 6.27) и пасмурную (рис. 6.28) погоду прогрев зерна до 33..34 °С и последующее включение системы активной вентиляции также обеспечивает интенсификацию процесса сушки.

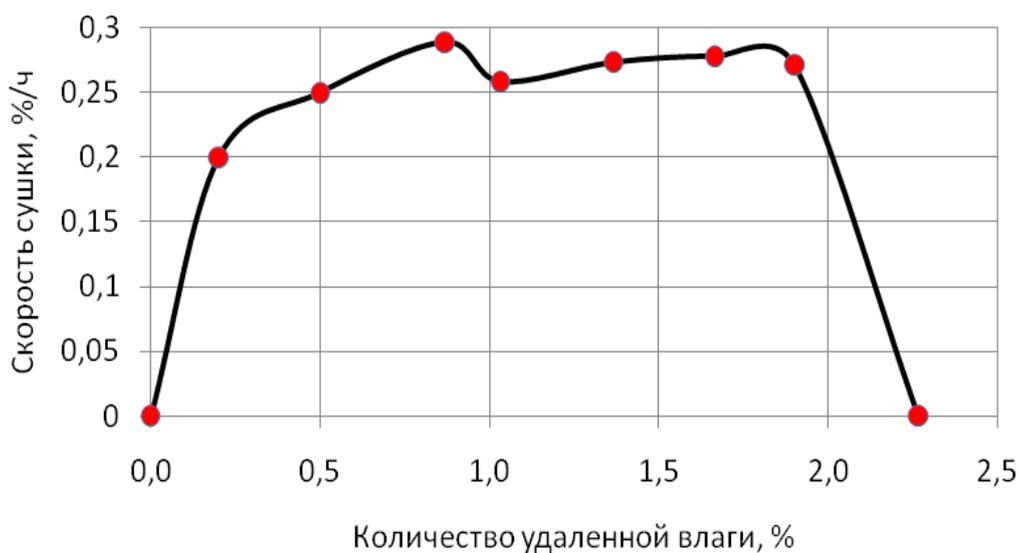


а



б

Рисунок 6.27 – Кривая скорости сушки (а) и температурная кривая (б) с постоянно включенным ТЭНом и вентилятором, включенным после разогрева зерна (через 5 часов) в облачную погоду (от 20 до 70 % облачности)



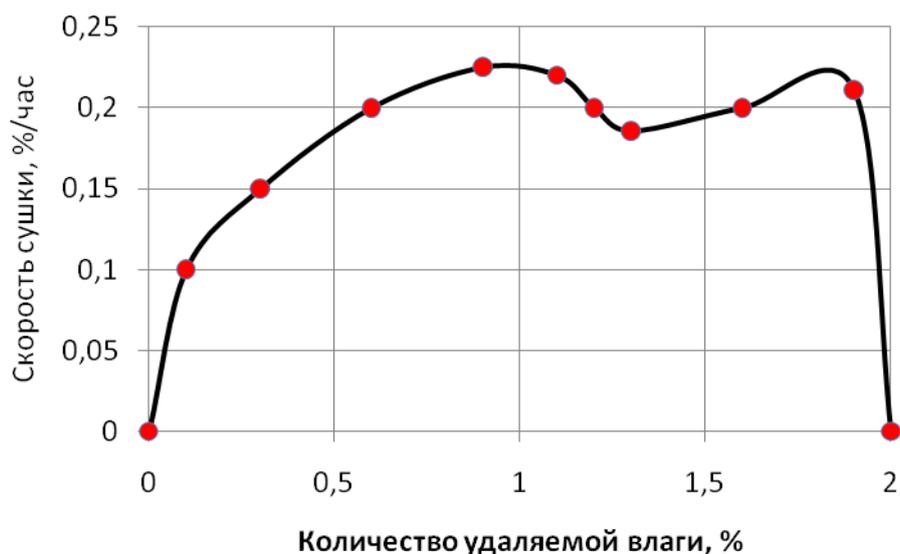
а



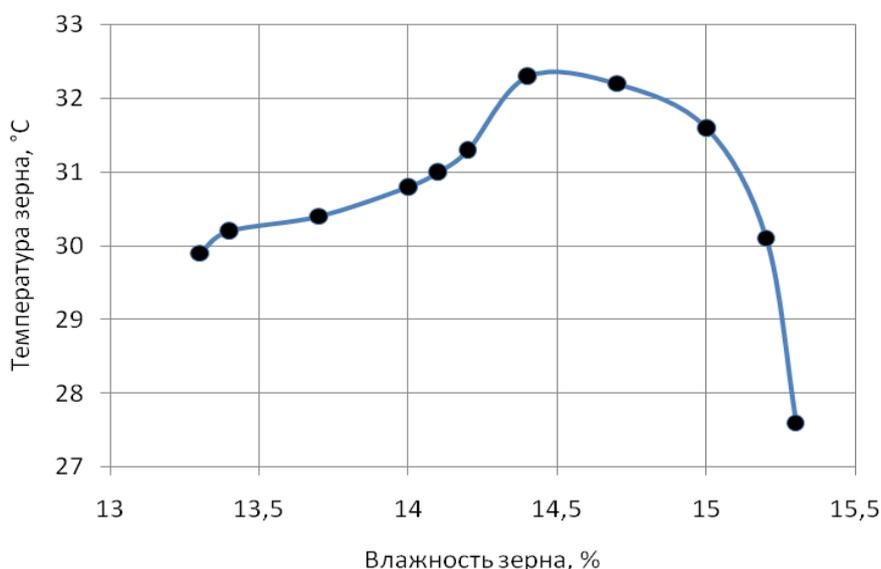
б

Рисунок 6.28 – Кривая скорости сушки (а) и температурная кривая (б) с постоянно включенным ТЭНом и вентилятором, включенным после разогрева зерна (через 4 часа) в пасмурную погоду (от 10 до 80 % облачности)

В ночное время при благоприятных погодных условиях в дневное время зерно может нагреваться до температуры 32...33 °С. В этом случае использование системы активной вентиляции также способствует интенсификации процесса сушки (рис. 6.29).



а



б

Рисунок 6.29 – Кривая скорости сушки (а) и температурная кривая (б) в ночное время с постоянно включенным ТЭНом и вентилятором, включенным через 7 часов

Анализ рис. 6.29 (б) показывает, что уже через 3...4 часа после начала процесса сушки можно было включить систему активной вентиляции.

В любом случае использование системы активной вентиляции предотвращает возможный нагрев зерна выше 40 °C как при электроподогреве сушильного агента, так и без подогрева.

Требуемая мощность привода вентилятора по формуле (3.13) составляет:

$$P_{\text{дв}} = \frac{V \cdot H}{102 \cdot \eta \cdot 3600} = \frac{2200 \cdot 3,3}{102 \cdot 0,2 \cdot 3600} = 0,1 \text{ кВт}.$$

Одной из важных решаемых задач является прогнозирование времени сушки зерна с использованием систем электроподогрева и активной вентиляции. Для проверки адекватности выражения (3.50) произведем расчет времени сушки для случаев работы системы электроподогрева и включения вентиляции после 3-х, 4-х и 6-ти часов сушки зерна (рис. 6.30).

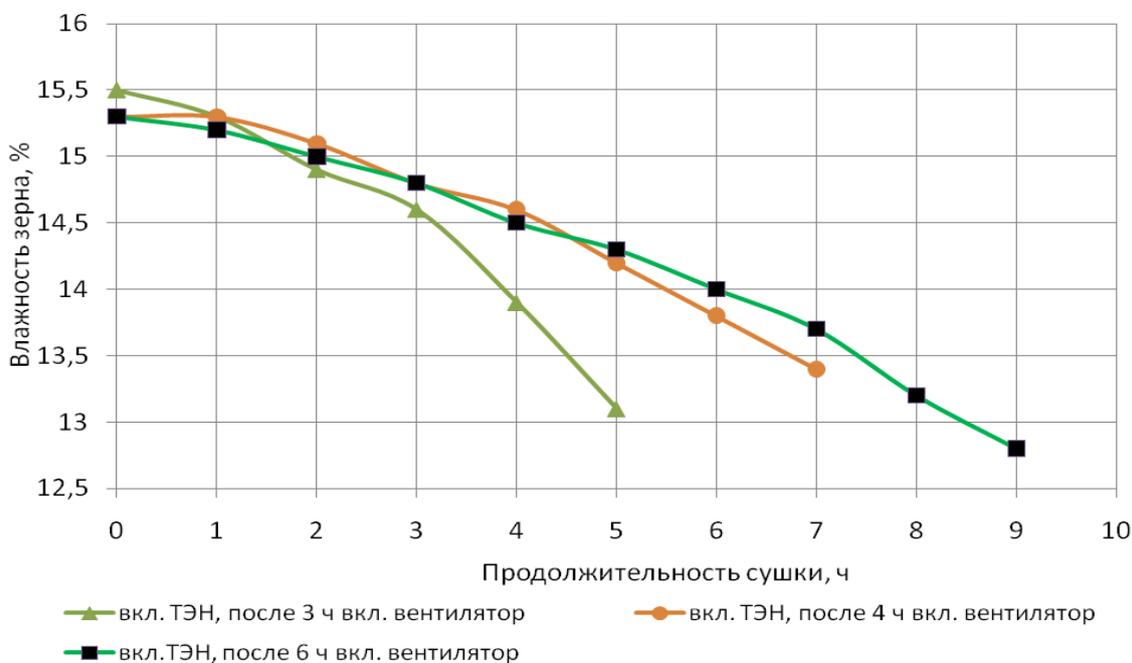


Рисунок 6.30 – Влияние времени начала включения вентилятора на продолжительность процесса сушки

Соответствующие кривые сушки для определения $N_{k,n}$, ΔN и влажности $\omega_{k,n}$ приведены на рис. 6.21, 6.31, 6.32. Окончанием процесса сушки считаем достижение значения влажности зерна равного 14 %.

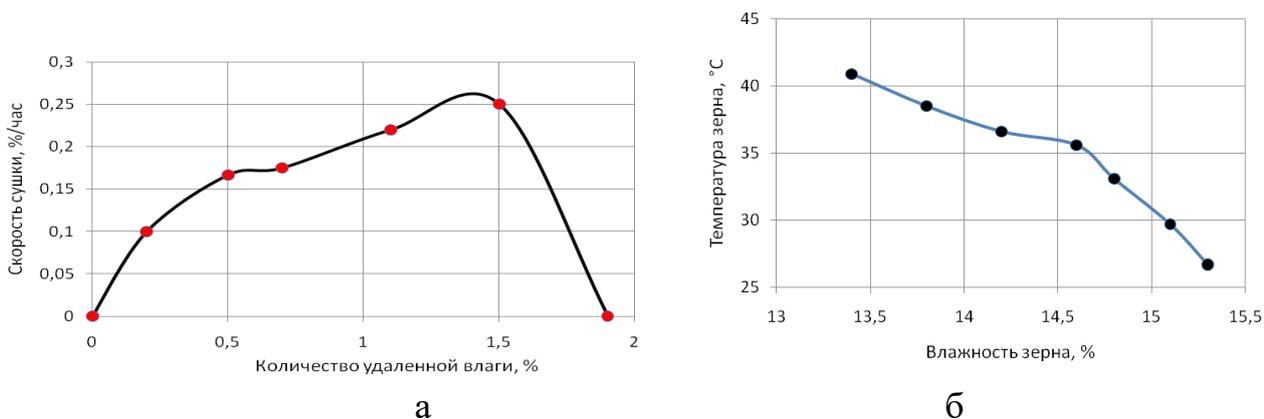
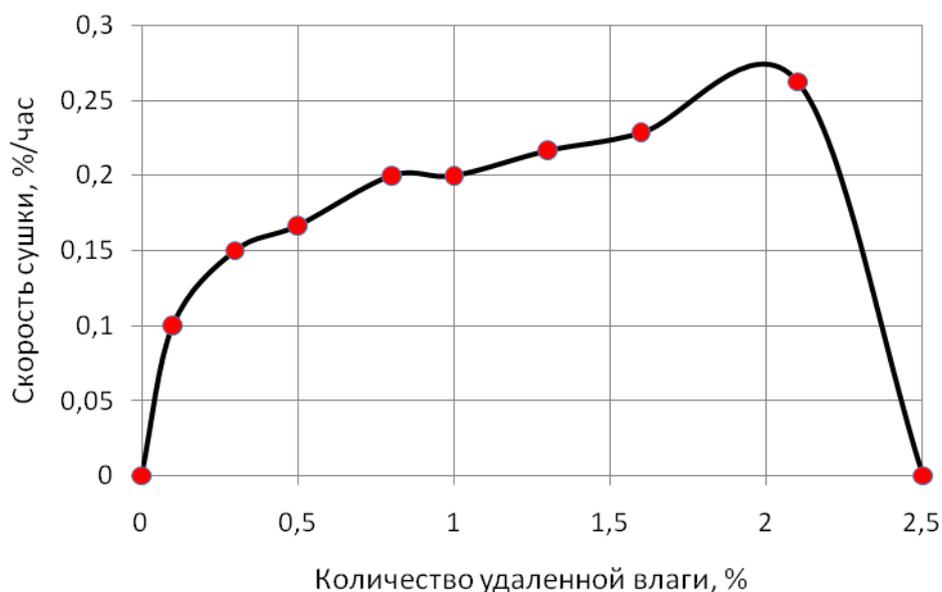
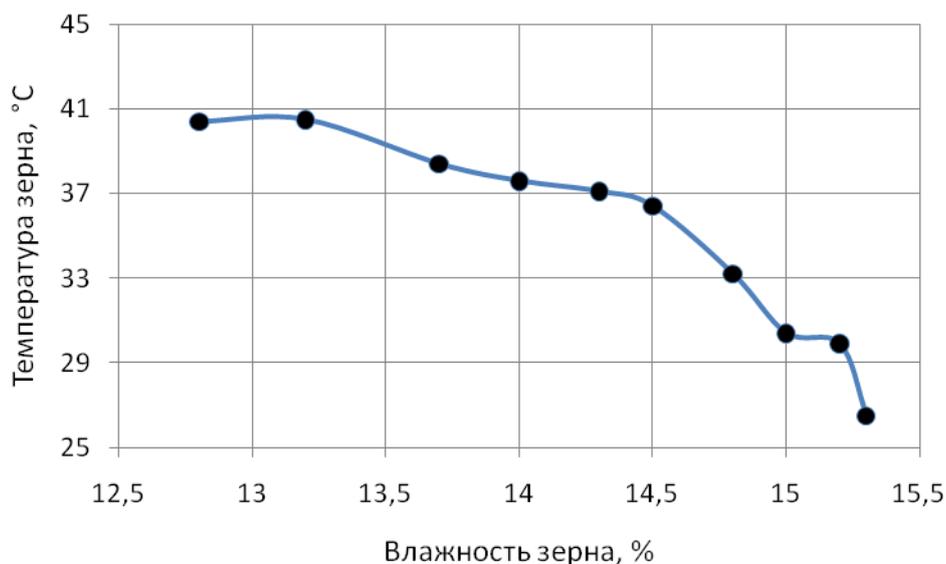


Рисунок 6.31 – Кривая скорости сушки (а) и температурная кривая (б) с постоянно включенным ТЭНом и вентилятором, включенным через 4 часа



а



б

Рисунок 6.32 – Кривая скорости сушки (а) и температурная кривая (б) с постоянно включенным ТЭНом и вентилятором, включенным через 6 часов

Анализ рис. 6.21, 6.31 и 6.32 показывает, что влажность зерна, равная 15%, в данном случае соответствует началу первого периода сушки, когда произошло удаление поверхностной, механически связанной влаги, стабилизируется скорость сушки и начинается ускорение нагрева зерна.

Таким образом, $\omega_{k.n}$ равно 15%. При этой влажности для случая включения вентилятора после 3-х часов сушки значение $N_{k.n}$ будет равно 0,27, после 4-х часов сушки – 0,13, после 6-ти часов сушки – 0,15%/ч. Последний режим

фактически соответствует сушке зерна только с использованием системы электроподогрева, т.к. через 6 ч влажность зерна уже достигла требуемых 14 %.

Значение приращения скорости сушки ΔN оценим как

$$\Delta N = \frac{N_{max}}{2}, \quad (6.1)$$

где N_{max} – максимальная скорость сушки с использованием систем активной вентиляции и электроподогрева, %/ч.

Для случая включения вентилятора после 3-х часов сушки значение N_{max} равно 0,4, после 4-х часов сушки – 0,26, после 6-ти часов сушки – 0,22 %/ч.

Тогда время сушки для случая включения вентилятора:

- после 3-х часов сушки по данным рис. 6.30 равно 3,85 ч, а расчетное значение

$$\tau_{суш} = \frac{1}{0,27 + \frac{0,4}{2}} \left[15,5 - 15,0 + 2,3 \cdot (15,0 - 12,0) \cdot \lg \frac{15,0 - 12,0}{14,0 - 12,0} \right] = 3,65 \text{ ч};$$

- после 4-х часов сушки по данным рис. 6.30 равно 5,50 ч, а расчетное значение

$$\tau_{суш} = \frac{1}{0,13 + \frac{0,26}{2}} \left[15,3 - 15,0 + 2,3 \cdot (15,0 - 12,0) \cdot \lg \frac{15,0 - 12,0}{14,0 - 12,0} \right] = 5,82 \text{ ч};$$

- после 6-ти часов сушки по данным рис. 6.30 равно 6,00 ч, а расчетное значение

$$\tau_{суш} = \frac{1}{0,15 + \frac{0,22}{2}} \left[15,3 - 15,0 + 2,3 \cdot (15,0 - 12,0) \cdot \lg \frac{15,0 - 12,0}{14,0 - 12,0} \right] = 5,82 \text{ ч}.$$

Отклонение фактического от расчетного значения времени сушки для рассматриваемых случаев соответственно равно 5,2, 5,8 и 3,0%.

Незначительное расхождение фактических и расчетных значений времени сушки свидетельствует об адекватности использования выражения (3.50) для прогнозирования времени сушки.

Глава 7 Технико-экономическая эффективность барабанной гелиосушилки зерна с водяным аккумулятором теплоты и системами активной вентиляции и электроподогрева сушильного агента

7.1 Критерий обоснования параметров барабанной гелиосушилки зерна

Одним из основных критериев обоснования параметров сельскохозяйственной техники является критерий минимума прямых эксплуатационных затрат [96].

Прямые эксплуатационные затраты, связанные с сушкой зерна в барабанной гелиосушилке с системами активной вентиляции и электроподогрева сушильного агента,

$$C_з = Z_A + Z_{ТО} + Z_{ЗП} + Z_{ЭЛ} \rightarrow \min \text{ руб./т,} \quad (7.1)$$

где Z_A – амортизационные затраты, связанные с реновацией сушилки;

$Z_{ТО}$ - затраты на ТО и ремонт сушилки;

$Z_{ЗП}$ - затраты на зарплату обслуживающего персонала;

$Z_{ЭЛ}$ - затраты на электрическую энергию.

Амортизационные затраты, связанные с реновацией сушилки

$$Z_A = \frac{K_M \cdot H_a \cdot C_{ГС}}{100 \cdot T_з \cdot W_ч}, \quad (7.2)$$

где K_M - коэффициент, учитывающий затраты на монтаж сушилки;

H_a - коэффициент амортизационных отчислений на реновацию сушилки;

$C_{ГС}$ - балансовая стоимость сушилки, руб.;

$T_з$ - сезонная загрузка сушилки, ч;

$W_ч$ - приведенная условная часовая производительность сушилки, т/ч.

С учетом конструкции гелиосушилки ее балансовую стоимость $C_{ГС}$ представим в виде:

$$C_{ГС} = C_{НК} + C_{ГА} + C_K + C_б + C_{ВК}, \quad (7.3)$$

где $C_{НК}$ - стоимость нижнего гелиоколлектора сушилки;

$C_{ГА}$ - стоимость водяного аккумулятора теплоты;

C_K - стоимость камеры сушильной с системой электроподогрева;

$C_б$ - стоимость барабана сушильного с приводом;

$C_{ВК}$ - стоимость верхнего солнечного коллектора с дефлектором и системой активной вентиляции.

Стоимость нижнего гелиоколлектора гелиосушилки

$$C_{\text{нк}} = C_{F_H} \cdot F_H, \quad (7.4)$$

где C_{F_H} - стоимость 1 м² нижнего гелиоколлектора сушилки, руб./м²;
 F_H - площадь нижнего гелиоколлектора сушилки, м².

Стоимость водяного аккумулятора теплоты

$$C_{\text{га}} = M_B \cdot C_B + M_{\text{ст}} \cdot C_{\text{ст}} + F_{\text{ак}} \cdot C_{\text{ак}}, \quad (7.5)$$

где M_B - масса воды в аккумуляторе теплоты гелиосушилки, кг;
 C_B - стоимость 1 кг воды, руб./кг;
 $M_{\text{ст}}$ - масса стенок аккумулятора теплоты гелиосушилки, кг;
 $C_{\text{ст}}$ - стоимость стенок аккумулятора теплоты гелиосушилки, руб./кг;
 $F_{\text{ак}}$ - площадь ограждений водяного аккумулятора теплоты, м²;
 $C_{\text{ак}}$ - стоимость 1 м² ограждений водяного аккумулятора, руб./м².

Массу воды и стенок водяного аккумулятора теплоты примем в виде:

$$M_B = K_B \cdot m_B, \quad M_{\text{ст}} = K_{\text{ст}} \cdot V, \quad (7.6)$$

где K_B - масса воды, приходящаяся на 1 кг готового продукта, кг/кг;
 $K_{\text{ст}}$ - масса стенок аккумулятора, приходящаяся на 1 кг готового продукта, кг/кг.

Стоимость камеры сушильной

$$C_K = F_K \cdot K_K + 2C_{\phi}, \quad (7.7)$$

где F_K - площадь ограждений камеры, м²;
 K_K - стоимость 1 м² ограждений камеры, руб./м²;
 C_{ϕ} - стоимость фартука камеры, руб.

Примем стоимость фартука камеры сушильной

$$C_{\phi} = K_{\phi} \cdot B, \quad (7.8)$$

где K_{ϕ} - стоимость фартука, приходящаяся на 1 м ширины сушилки руб./м.

Стоимость барабана сушильного с приводом

$$C_{\delta} = C_{\text{бар}} + C_{\text{пр}}, \quad (7.9)$$

где $C_{\text{бар}}$ - стоимость сушильного барабана, руб.;

$C_{\text{пр}}$ - стоимость привода барабана, руб.

Стоимость барабана сушильного

$$C_{\text{бар}} = K_{\text{бар}} \cdot m_{\text{з}}, \quad (7.10)$$

где $K_{\text{бар}}$ - стоимость барабана сушильного, приходящаяся на 1 кг массы находящегося в нем зерна, руб./кг.

Стоимость верхнего солнечного коллектора с дефлектором и системой активной вентиляции

$$C_{\text{вк}} = F_{\text{в}} \cdot C_{F_{\text{в}}} + C_{\text{деф}} + C_{\text{вен}}, \quad (7.11)$$

где $F_{\text{в}}$ - площадь верхнего солнечного коллектора, м²;

$C_{F_{\text{в}}}$ - стоимость 1 м² площади верхнего солнечного коллектора, руб./м²;

$C_{\text{деф}}$ - стоимость дефлектора, руб.;

$C_{\text{вен}}$ - стоимость системы активной вентиляции, руб.

Площадь верхнего солнечного коллектора, стоимость дефлектора и стоимость системы активной вентиляции также примем в функции ширины гелиосушилки в виде:

$$F_{\text{в}} = K_{\text{вк}} \cdot B, \quad C_{\text{деф}} = K_{\text{деф}} \cdot B, \quad C_{\text{вен}} = K_{\text{вен}} \cdot B, \quad (7.12)$$

где $K_{\text{вк}}$ - площадь верхнего солнечного коллектора, приходящаяся на 1 м ширины гелиосушилки, м²/м;

$K_{\text{деф}}$ - стоимость дефлектора, приходящаяся на 1 м ширины гелиосушилки, руб./м;

$K_{\text{вен}}$ - стоимость системы активной вентиляции, приходящаяся на 1 м ширины гелиосушилки, руб./м.

Условную часовую производительность сушилки определим в виде:

$$W_{\text{ч}} = \frac{10^{-3} \cdot m_{\text{з}}}{\tau_{\text{суш}}}, \quad (7.13)$$

где $\tau_{\text{суш}}$ - время сушки зерна до требуемой влажности, ч.

Затраты на ТО и ремонт гелиосушилки

$$Z_{\text{ТО}} = \frac{C_{\text{гс}} \cdot H_{\text{ТО}}}{100 \cdot (T_{\text{загр}} \cdot W_{\text{ч}})}, \quad (7.14)$$

где $H_{\text{ТО}}$ - коэффициент амортизационных отчислений на ТО и ремонт сушилки.

Затраты на зарплату

$$Z_{\text{зп}} = \frac{C_m \cdot K_{\text{сл}} (1 + K_{\text{доп}}) \cdot L}{W_{\text{ч}}}, \quad (7.15)$$

где C_m - тарифная ставка обслуживающего персонала, руб./ч;

$K_{\text{сл}}$ - коэффициент сложности работ;

$K_{\text{доп}}$ - размер дополнительной оплаты труда, %;

L - число обслуживающего персонала, чел.

Затраты на электрическую энергию с учетом 70 % времени включения вытяжного вентилятора в течение времени сушки

$$Z_{\text{эл}} = \frac{(N_{\text{эл}} + N_{\text{эн}} + 0,7N_{\text{в}}) \cdot C_{\text{эл}}}{W_{\text{ч}}}, \quad (7.16)$$

где $N_{\text{эл}}$ - мощность привода сушильного барабана, кВт;

$N_{\text{эн}}$ - мощность трубчатого электронагревателя, кВт;

$N_{\text{в}}$ - мощность привода вытяжного вентилятора, кВт;

$C_{\text{эл}}$ - стоимость 1 кВт·ч.

Меняя значение массы зерна, загружаемого в сушильный барабан, по критерию (7.1) определяем минимум прямых эксплуатационных затрат на сушку и соответствующие ему параметры гелиосушилки.

7.2 Экономическая эффективность барабанной гелиосушилки зерна с водяным аккумулятором теплоты, системами активной вентиляции и электроподогрева сушильного агента

Математическая модель обоснования параметров барабанной гелиосушилки включает аналитические выражения 3.4, 3.12, 3.13, 3.23, 3.24, 3.34, 3.43, 3.50, 5.1 - 5.16, а также полученные регрессионные зависимости 6.1 - 6.3.

Первая страница листинга программы обоснования параметров барабанной гелиосушилки в среде «Excel 7.0» представлена на рис. 7.1.

Значения энтальпии атмосферного воздуха, энтальпии сушильного агента и отработанного агента сушки на выходе из вытяжной трубы рассчитывались

по стандартным методикам на основании выполненных измерений и $I-d$ диаграммы.

Тепловой КПД за один цикл сушки барабанной гелиосушилки в дневное время

$$\eta_{\partial} = \frac{1}{L \cdot i_0 + \sum Q_{H_{cp} F_H + Q_3} \cdot \left(\frac{m_B \cdot r}{\tau_{суш}} + Q_3 + Q_B \right)}, \quad (7.17)$$

где r - теплота парообразования, Дж/кг;

Q_3 – количество теплоты, выделяемой ТЭНом, Дж/с.

наименование параметров	значения параметров						
Масса высушиваемого зерна - т/шт, кг	300	300	600	900	1200	1500	2000
Плотность потока солнечной энергии - Q _{ср} , Вт/м ²	480	480	480	480	480	480	480
Удельная теплоемкость зерна - С _з , Дж/(кг*град)	1990	1990	1990	1990	1990	1990	1990
Температура нагрева зерна - t _{ак} , град *	35,2	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5	38,5
Температура влажного зерна - t _в , град	26	26	26	26	26	26	26
Коэффициент теплообмена, К, Вт/град	50	50	50	50	50	50	50
λ	8,38E-05	8,38E-05	8,38E-05	8,38E-05	8,38E-05	8,38E-05	8,375E-05
Время нагрева зерна - t, с	21600	18000	18000	18000	18000	18000	18000
Скорость сушки - N, %/ч	0,29	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47
Значение первой критической влажности зерна - ш _к , %	15	15	15	15	15	15	15
Равновесная влажность зерна - ш _р , %	12	12	12	12	12	12	12
Время сушки зерна - T _{сушки} , с	39911	24626	24626	24626	24626	24626	24626
Коэффициент теплопередачи - K _в , Вт/(м ² *град)	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
Удельная площадь ограждения гелиосушилки - K _{ог} , м ² /кг	0,167	0,167	0,118	0,101	0,093	0,088	0,084
Температура теплопринимающей поверхности - T _п , град *	48,2	48,2	48,2	48,2	48,2	48,2	48,2
Температура сушильного агента после водяного аккумулятора - T _{с.в} , град *	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1
Температура сушильного агента в сушильной камере с электронагревом - T _{с.в} , град *	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1	42,1
Начальная температура атмосферного воздуха - t _{оср} , град	22	22	22	22	22	22	22
Средний удельный расход сушильного агента - L, кг/с/кг зерна	0,0006	0,0009	0,0009	0,0009	0,0009	0,0009	0,0009
Энтальпия атмосферного воздуха на входе - I _в , Дж/кг	44891,14	44891,14	44891,14	44891,14	44891,14	44891,14	44891,14
Энтальпия сушильного агента на выходе из барабана - I ₂ , Дж/кг	69364,09	69364,09	69364,09	69364,09	69364,09	69364,09	69364,09
Удельная масса сушильного барабана - K _б , кг/кг	0,2	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,48
Удельная теплоемкость барабана - С _б , Дж/(кг*град)	204	204	204	204	204	204	204
Время прогрева барабана - T _{бпрог} , с	21600	18000	18000	18000	18000	18000	18000

Рисунок 7.1 - Фрагмент листинга программы обоснования параметров барабанной гелиосушилки

Тепловой КПД барабанной гелиосушилки в ночное время

$$\eta_{\partial} = \frac{m_B \cdot r}{(L \cdot i_0 + Q_3 + Q_3) \cdot \tau_{суш}}. \quad (7.18)$$

Тарифную ставку работников, коэффициенты сложности и доплат, коэффициенты учитывающие затраты на монтаж, ТО и ремонт, амортизационные отчисления, а также сезонную загрузку гелиосушилки приняли согласно нормативным документам.

Такие конструктивные параметры как требуемая мощность электропривода сушильного барабана, площадь ограждений гелиосушилки и другие приняты на основании [17, 82, 104].

На основании проведенных расчетов получены зависимости прямых эксплуатационных затрат на процесс, а также необходимой площади нижнего гелиоколлектора от вместимости барабана (рис. 7.2).

Анализ показывает, что прямые эксплуатационные затраты резко снижаются до вместимости сушильного барабана 1200 кг. Затем снижение затрат незначительно. Площадь нижнего гелиоколлектора при этом возрастает пропорционально.

Учитывая, что у серийных барабанных зерносушилок типа СЗ максимальная длина сушильного барабана равна 10500 мм (у сушилки СЗ-15), для диаметра 0,7 м максимальная вместимость сушильного барабана может составить 2000 кг при ширине гелиосушилки 10 м.

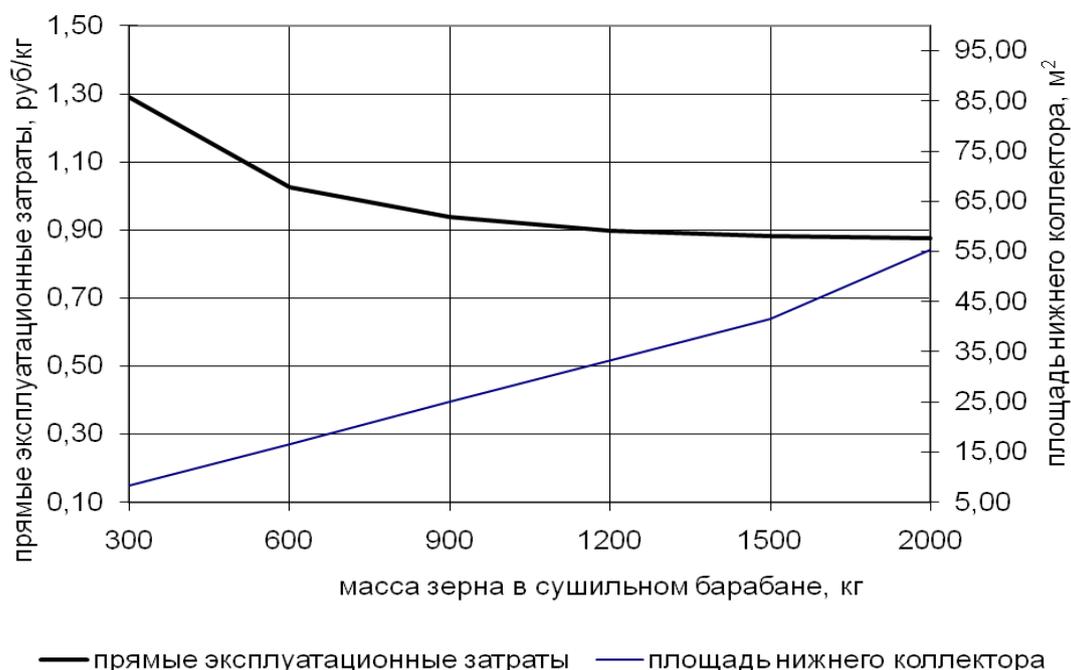


Рисунок 7.2 - Зависимость прямых эксплуатационных затрат на процесс и необходимой площади нижнего гелиоколлектора от массы зерна в сушильном барабане

Однако, рекомендуемое из прочностных соображений отношение диаметра к длине барабана лежит в пределах 0,25...0,125. Поэтому для диаметра барабана 0,7 м при вместимости барабана 1200 кг максимальная ширина гелиосушилки составит 6,16 м. Расчетное время сушки - 6,84 ч. Прямые эксплуатационные затраты на процесс сушки составят 900 руб./т.

Расчетная продолжительность процесса сушки партии зерна без использования систем активной вентиляции и электроподогрева сушильного агента составляет 11,09 часов, с использованием – 6,84 часа.

Таким образом, расчетами определены следующие оптимальные конструктивно-технологические параметры барабанной гелиосушилки: диаметр сушильного барабана 0,7 м; длина сушильного барабана 5,8 м; вместимость

сушильного барабана 1200 кг; требуемая мощность электродвигателя привода барабана 0,71 кВт; вместимость водяного аккумулятора гелиосушилки 1200 л; площадь нижнего гелиоколлектора 33,3 м²; площадь верхнего гелиоколлектора 9,1 м²; ширина гелиосушилки 6,2 м; длина гелиосушилки 5,9 м; высота гелиосушилки 5,4 м.

Производительность сушилки характеризуется удельной производительностью q , показывающей, какая масса зерна высушивается в 1 м³ гелиосушилки за час. За время $\tau_{\text{суш}}$ при сушке зерна массой m кг в барабане объемом $V = m/(\rho \cdot \varphi)$ удельная производительность барабанной гелиосушилки будет равна:

$$q = \frac{m}{V \cdot \tau_{\text{суш}}} = \frac{\rho \cdot \varphi}{\tau_{\text{суш}}} = \frac{722 \cdot 0,75}{6,84} = 79 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{ч}}. \quad (7.19)$$

В структуре прямых эксплуатационных затрат наибольшую долю составляют затраты на реновацию сушилки (рис. 7.3).

С увеличением вместимости сушильного барабана возрастает доля затрат на реновацию сушилки при снижении доли затрат на заработную плату (рис. 7.4).

Стоимость барабанной гелиосушилки с рекомендуемыми конструктивными параметрами составит 379 тыс. руб. в ценах 2016 г. На рис. 7.5 представлена структура стоимости гелиосушилки.

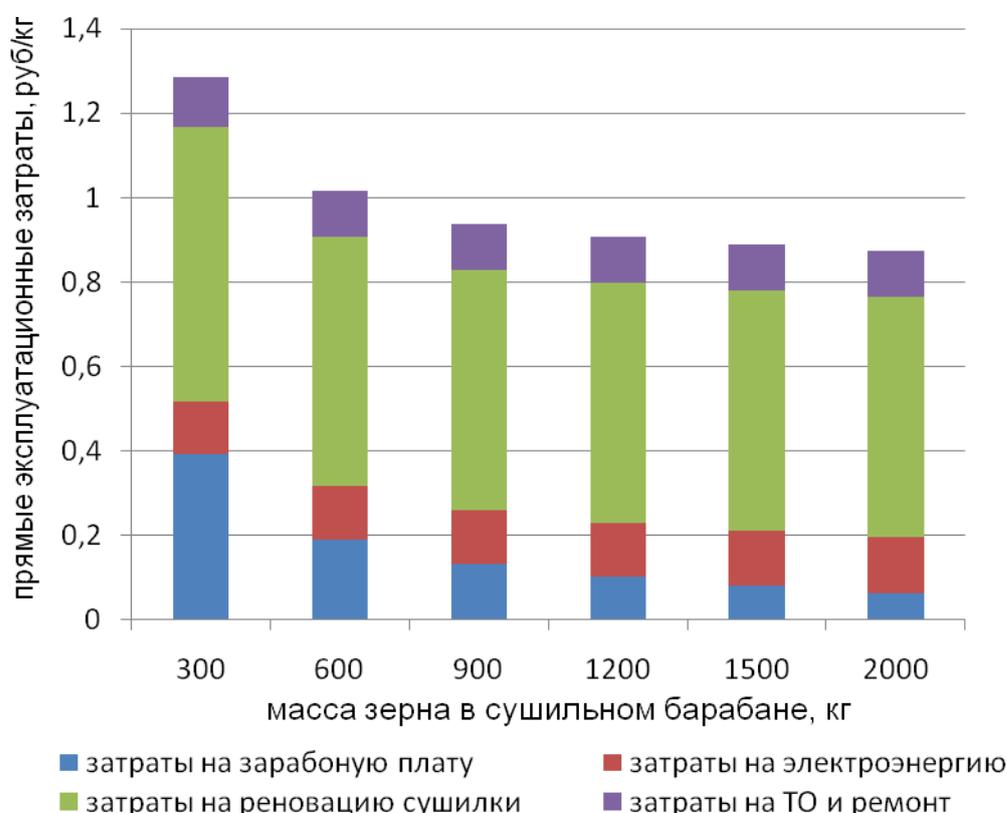


Рисунок 7.3 - Структура составляющих прямых эксплуатационных затрат

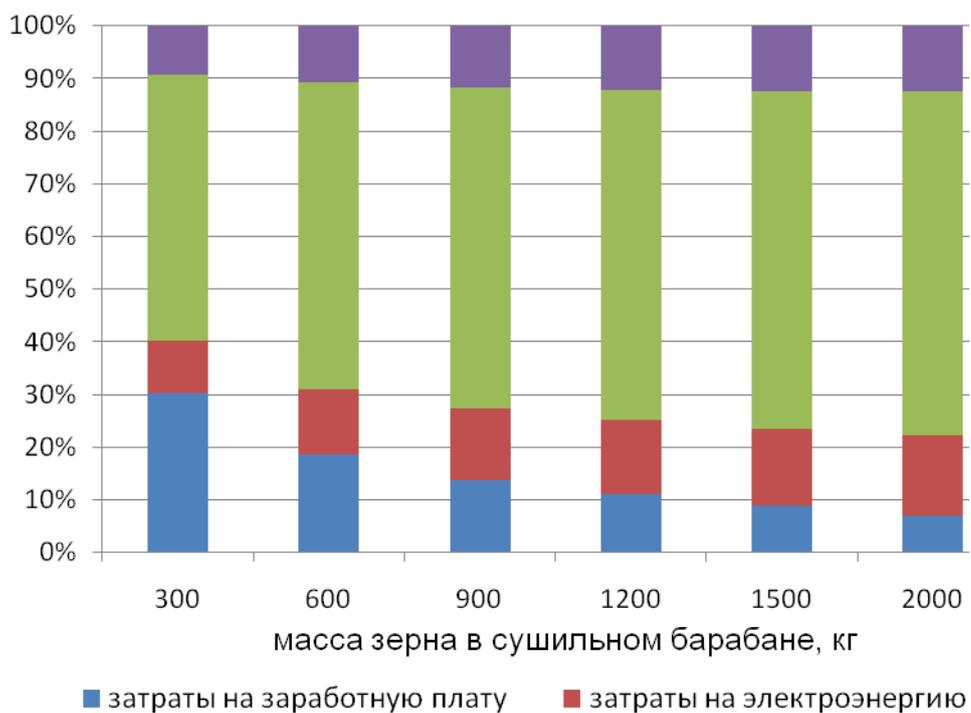


Рисунок 7.4 - Характер изменения структуры составляющих прямых эксплуатационных затрат

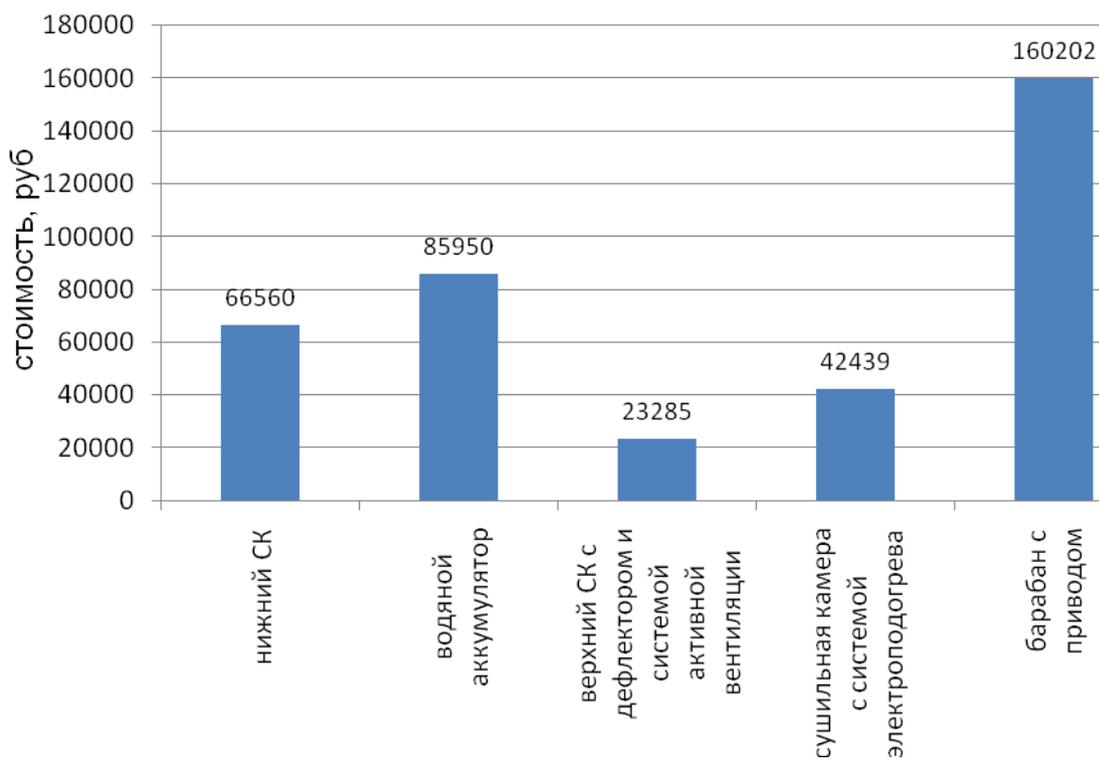


Рисунок 7.5 - Структура составляющих стоимости гелиосушилки

Анализ показывает (рис. 7.6), что стоимость сушильного барабана с приводом составляет до 45 % от общей стоимости гелиосушилки.

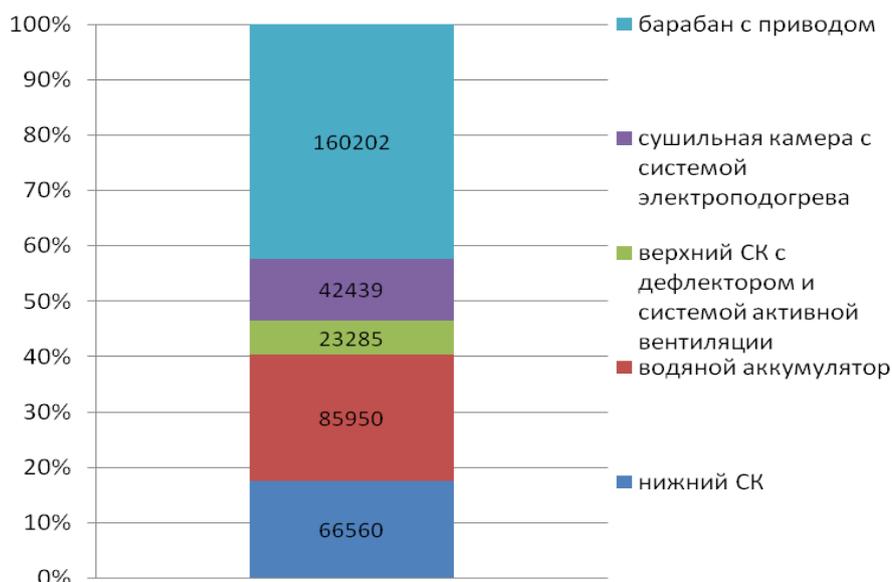


Рисунок 7.6 - Доли составляющих в структуре стоимости гелиосушки

Сравнение прямых эксплуатационных затрат экспериментального образца гелиосушки вместимостью 300 кг зерна без использования систем активной вентиляции и электроподогрева и с использованием данных систем показало, что их использование позволяет в 1,3 раза уменьшить прямые эксплуатационные затраты за счет сокращения продолжительности сушки (рис. 7.7).

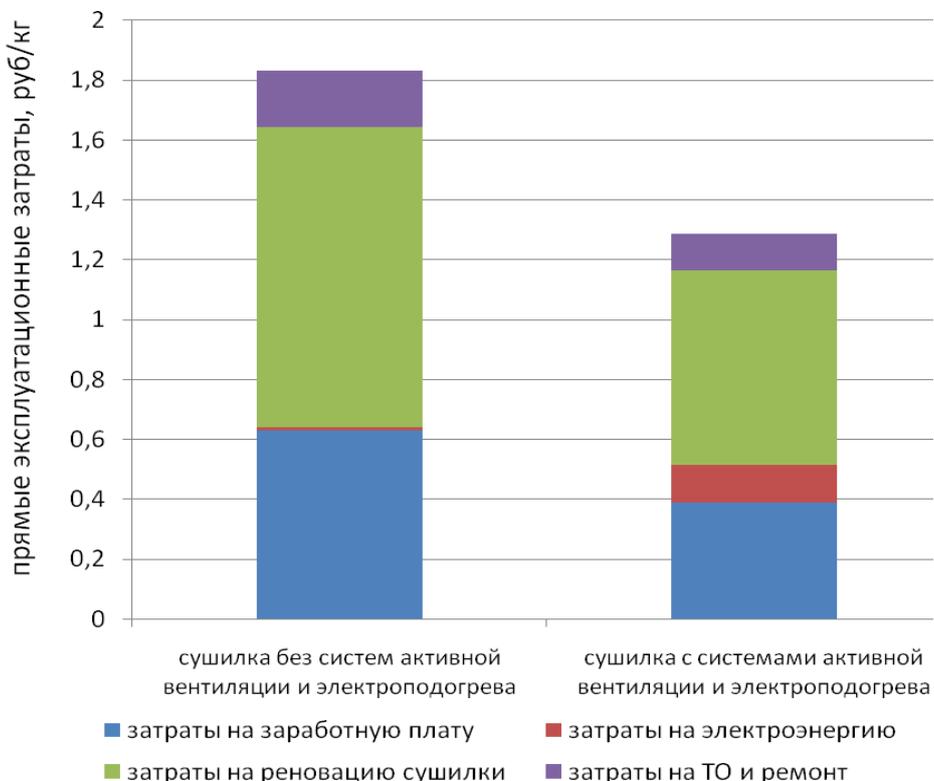


Рисунок 7.7 - Структура составляющих прямых эксплуатационных затрат

Увеличение вместимости сушильного барабана уменьшает удельную площадь ограждений гелиосушки, что снижает удельные теплотери через них (рис. 7.8).

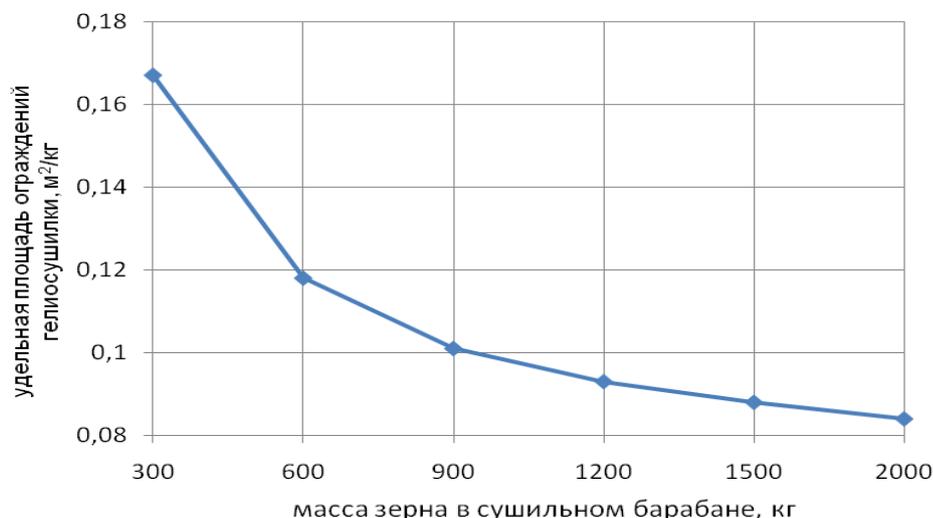


Рисунок 7.8 - Зависимость удельной площади ограждений гелиосушки от вместимости сушильного барабана

Распределение солнечной энергии, поступающей на нижний гелиоколлектор, показывает, что большая часть энергии расходуется на подогрев агента сушки - 75 % (рис. 7.9).

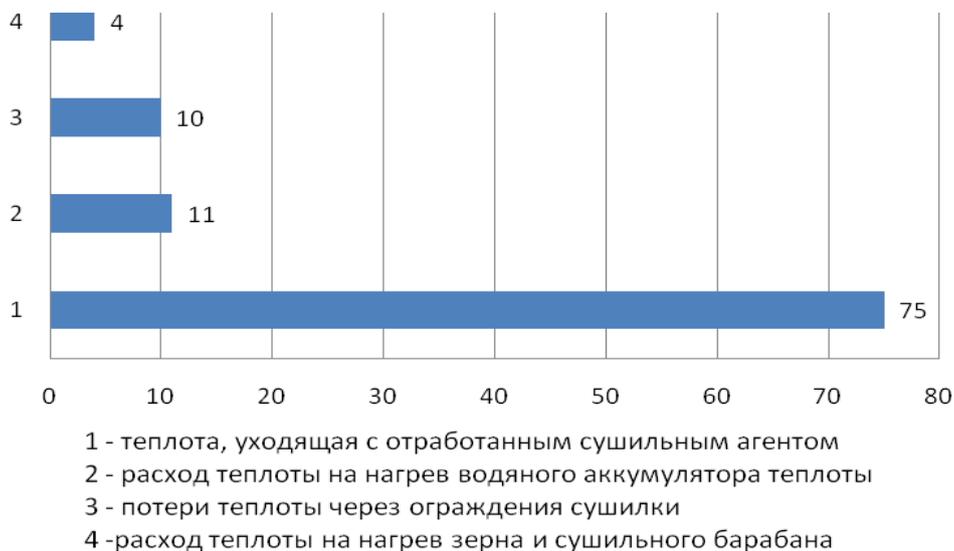


Рисунок 7.9 - Структура распределения солнечной энергии, поступающей на нижний коллектор (в %)

Тепловой КПД гелиосушки в дневное время суток составил 0,14, в ночное время - 0,09.

Глава 8. Технология досушивания зерна при хранении в гелиосушилке-зернохранилище

С целью совмещения технологических операций энергосберегающей сушки и хранения зерновых культур, была предложена конструкция зернохранилища со встроенной гелиосушильной системой (далее зернохранилище) и проведены предварительные испытания физической модели зернохранилища (см. рис. 3, 4).

Для оценки скорости прохождения воздуха через макетный образец использовали подкрашивание воздуха дымом от тлеющего бумажного фитиля.

Было проведено пять опытов (табл. 8.1), процесс испытаний снимался на видеокамеру.

Таблица 8.1 – Варианты и результаты проведенных опытов

Вариант опыта	Результат опыта
1. Отсутствие подогрева коллекторов, неработающий вентилятор	Движения воздуха в вытяжной трубе не наблюдается
2. Подогрев коллектора вытяжной трубы	Заметно движение воздуха в вытяжной трубе
3. Подогрев обоих коллекторов макета	Активное движение воздуха в вытяжной трубе
4. Подогрев обоих коллекторов макета и дополнительно включен вентилятор на небольшую скорость вращения	Усиление движения воздуха в вытяжной трубе
5. Подогрев обоих коллекторов макета и дополнительно включен вентилятор на большую скорость вращения	Интенсивное движение воздуха в вытяжной трубе

Таким образом, предварительные испытания показали работоспособность предлагаемой конструкции зернохранилища со встроенной гелиосушильной системой.

Гелиосушилка-зернохранилище содержит (рис. 8.1, 8.2) вертикальный солнечный коллектор 1 со светопрозрачным покрытием 2 и светопоглощающей поверхностью 3, примыкающий к ее боковой стене, сушильную камеру 4 с перфорированным настилом 5 для размещения на нем высушиваемого зерна 6, и вытяжную трубу 7 с дефлектором 8, представляющую собой также солнечный коллектор [33, 57].

Под настилом 5 размещен гравийный аккумулятор 9, а на настиле 5 расположены перфорированные воздухораспределительные каналы 10, количество и высота которых выбираются такими, чтобы расстояние между ними и от верха канала до поверхности высушиваемого материала было примерно одинаковым, обеспечивающим прохождение агента сушки через всю толщу зерна (оптимально – от 50 до 70 см). Поднастильное пространство сообщается с вертикальным солнечным коллектором 1 посредством проемов 11 в стене зернохранилища.

Деление сушильной камеры на отсеки при сушке, например, различных сортов или видов сельскохозяйственных культур производится продольной 12 и поперечными 13 перегородками. Вдоль отсеков проходит технологический коридор, по торцам которого располагаются ворота 14. Регулирование воздухообмена в зернохранилище производится с помощью заслонок 15.

Процесс сушки при хранении протекает следующим образом. За счет тяги, возникающей в вытяжной трубе 7, наружный воздух поступает через входную щель под козырьком 16 в солнечный коллектор 1, где подогревается и через проемы 11 распространяется в поднастильном пространстве, одновременно нагревая гравийный аккумулятор 9. Перфорированные настилы 5 и воздухораспределительные каналы 10 равномерно распределяют подогретый воздух в массе высушиваемого зерна 6. Увлажненный после прохождения через слой зерна воздух удаляется через вытяжную трубу 7 и дефлектор 8. В ночное время сушка продолжается за счет тепла, отдаваемого гравийным аккумулятором. Для регулирования воздухообмена в зависимости от параметров окружающей среды и состояния зерновой массы используются заслонки 15.

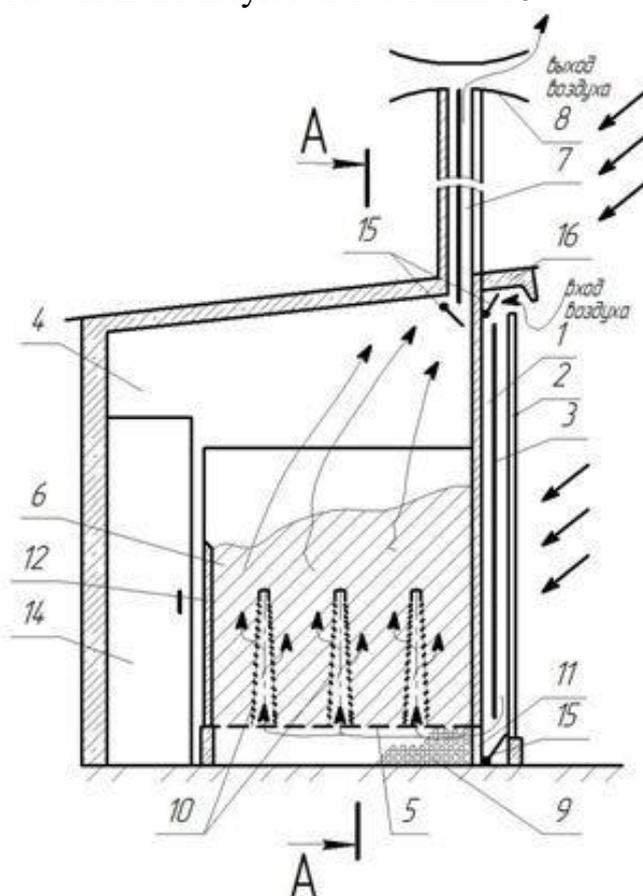


Рисунок 8.1 – Схема гелиосушилки-зернохранилища со встроенной гелиосушильной системой (вид сбоку)

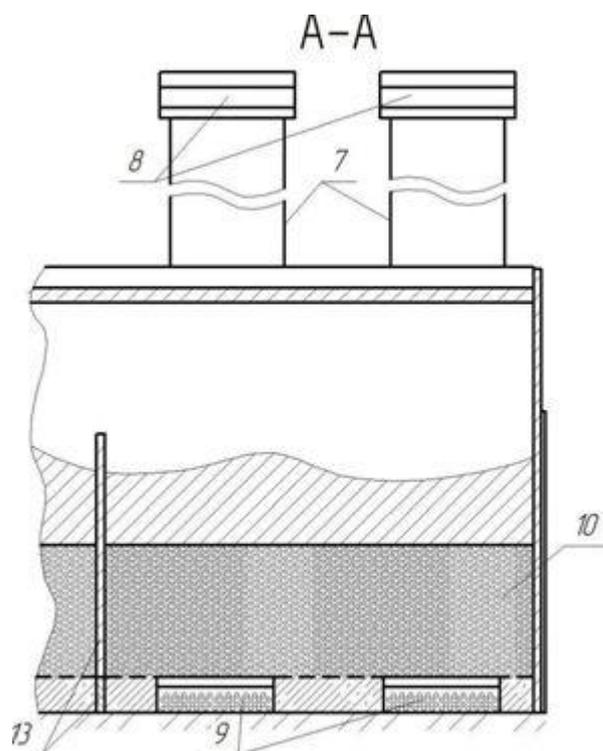


Рисунок 8.2 – Продольный разрез гелиосушилки-зернохранилища

В соответствии с договором о научно-техническом сотрудничестве с ООО «ОКБ по теплогенераторам» по техническому заданию была изготовлен опытный образец секции гелиосушилки-зернохранилища. Общий вид секции представлен на рис. 8.3, 8.4, 8.5.



Рисунок 8.3 – Вид секции спереди



Рисунок 8.4 – Общий вид секции зернохранилища со встроенной гелиосушильной системой

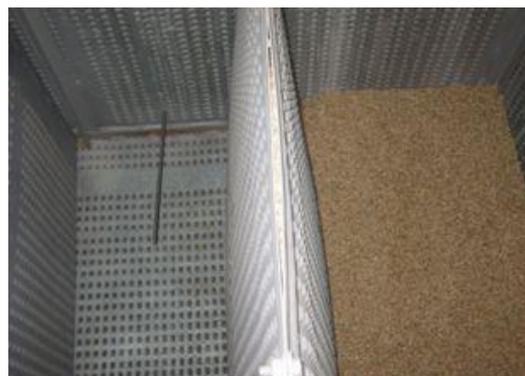


Рисунок 8.5 – Распределение зерна в зернохранилище со встроенной гелиосушильной системой

Входная щель в нижний коллектор конструктивно может быть открыта как в верхней части, так и в нижней. Основным вариантом является нижнее расположение входной щели, так как в этом случае увеличивается вдвое путь поступающего воздуха, что должно увеличить температуру его подогрева в коллекторе. Кроме того, при верхнем расположении входной щели имеется вероятность при определенных условиях либо обратной тяги и, соответственно, нарушения технологического процесса сушки, либо потери части подогретого воздуха.

Для оценки работоспособности предлагаемой конструкции были смонтированы восемь датчиков температуры (рис. 8.6): на входе в нижний коллектор, в верхней части нижнего коллектора, на входе в сушильную камеру, внизу средней части сушильной камеры, внизу и вверху задней части сушильной камеры, на входе и выходе верхнего коллектора.

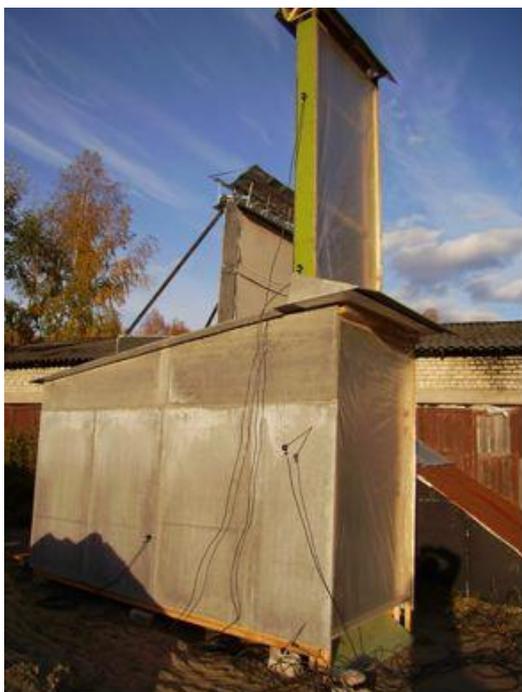


Рисунок 8.6 – Расположение датчиков температуры

Для определения температуры и влажности атмосферного воздуха использовали термогигрометр Testo 625. Для определения скорости воздуха на входе в нижний коллектор и на выходе верхнего коллектора использовали термоанемометр Testo 405-V1. Сбор данных с трехпроводных термодатчиков сопротивления и их фиксацию в непрерывном режиме осуществляли с помощью измерителя-регулятора ТРМ 138, адаптора АС-4 и ноутбука (рис. 8.7).

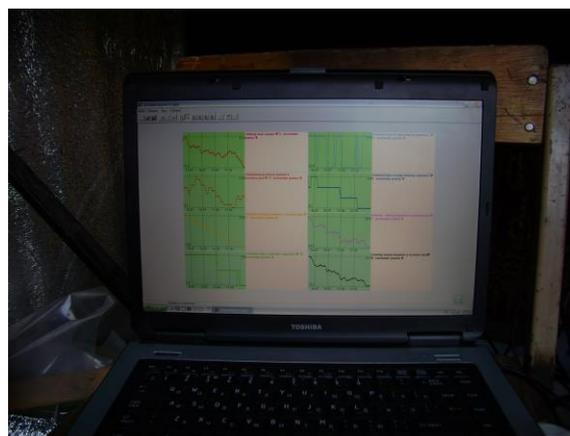
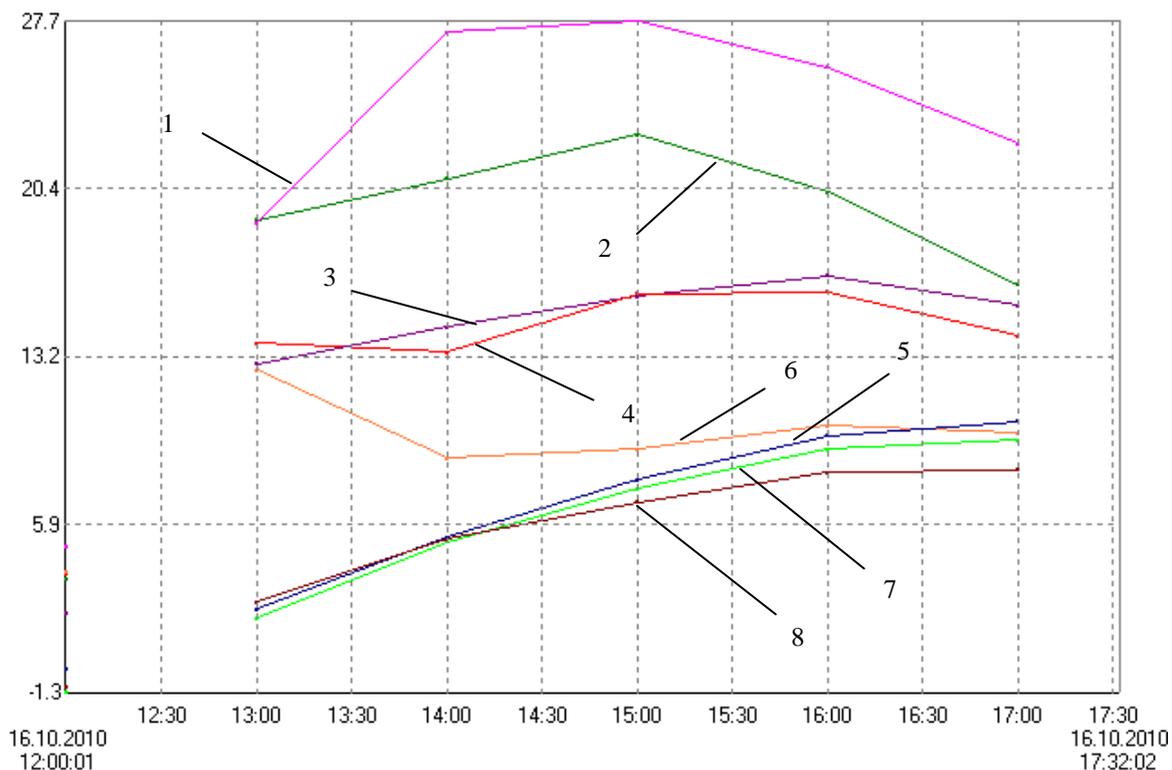


Рисунок 8.7 – Аппаратура для фиксирования результатов измерений

Опыт проводился 16 октября с 10 ч до 17 ч. Погода была солнечной, безоблачной, ветер умеренный, температура воздуха ночью была до минус 3 °С, днем 7...9 °С.

На основании полученных данных построен график изменения температуры сушильного агента в секции зернохранилища (рис. 8.8).



- 1 - на входе в сушильную камеру 5 - вверху задней части сушильной каме-
 2 - на выходе верхнего коллектора ры
 3 - на входе верхнего коллектора 6 – температура окружающей среды
 4 - в верхней части нижнего кол- 7- внизу средней части сушильной камеры
 лектора 8 - внизу задней части сушильной камеры

Рисунок 8.8 – График изменения температуры сушильного агента

Данные по скорости движения воздуха на входе и выходе секции представ-
 лены в таблице 3.

Таблица 8.2 - Скорость движения воздуха на входе и выходе секции

Показатель	в 12 ⁰⁰ ч.	в 13 ⁰⁰ ч	в 14 ⁰⁰ ч	в 15 ⁰⁰ ч	в 16 ⁰⁰ ч	в 17 ⁰⁰ ч
Скорость движения воз- духа на входе в нижний коллектор, м/с	0,51	0,41	0,78	0,98	0,69	1,13
Скорость движения воз- духа на выходе из верх- него коллектора, м/с	0,94	0,83	1,11	1,23	1,07	1,19

Анализ полученных результатов на рис. 8.8 показывает, что:

- оптимальной схемой движения воздуха в нижнем коллекторе является
 подача его через нижнее входное окно, движение вверх вдоль передней стенки
 тепловоспринимающей поверхности, ее огибание в верхней части, движение

вниз за тепловоспринимающей поверхностью к нижнему входному окну в сушильную камеру. В отличие от верхней подачи путь движения воздуха увеличивается вдвое, что обеспечивает соответственно более чем вдвое его больший подогрев (линии 1, 4, 6 на рис. 8.8);

- верхний солнечный коллектор обеспечивает подогрев отработанного воздуха (линии 2, 3 рис. 16), что увеличивает тягу в вытяжной трубе (табл. 8.2);

- воздухораспределительная система обеспечивает равномерный прогрев всего объема сушильной камеры (линии 5, 7, 8 рис. 8.8);

- максимальные значения температуры сушильного агента в обоих коллекторах достигаются к 15⁰⁰ часам, аналогично данным проведенных ранее исследований барабанной гелиосушилки с наклонным нижним коллектором. Максимальный подогрев атмосферного воздуха в нижнем коллекторе составил порядка 20 °С, что равносильно снижению относительной влажности воздуха в среднем на 50 %. Продолжающийся рост температуры в металлической сушильной камере объясняется ее дальнейшим отогреванием после ночного заморозка;

- предлагаемая технология обеспечивает досушивание зерна в процессе его хранения без потери семенных и технологических качеств.

При удельном расходе жидкого топлива в шахтных и колонковых сушилках порядка 1 кг/т/% использование предлагаемой технологии досушивания зерна в процессе его хранения в зернохранилище со встроенной гелиосушильной системой позволит сэкономить в расчете на 1 т зерна с исходной влажностью 20 % 180 руб. на стоимости топлива (при цене 20 руб./кг). При этом не учитываем экономию дополнительных затрат на электроэнергию, потребляемую работающим оборудованием (в среднем 1 кВт/т/%). Экономия также будет получена за счет уменьшения отчислений на амортизацию, техническое обслуживание, ремонт сушильного оборудования, заработную плату рабочих, снижения объема погрузочно-разгрузочных и транспортных работ.

Предложенная схема вертикального расположения солнечного коллектора гелиосушильной системы позволяет решить проблему с нерациональным отводом земельной площади для размещения наклонных солнечных коллекторов.

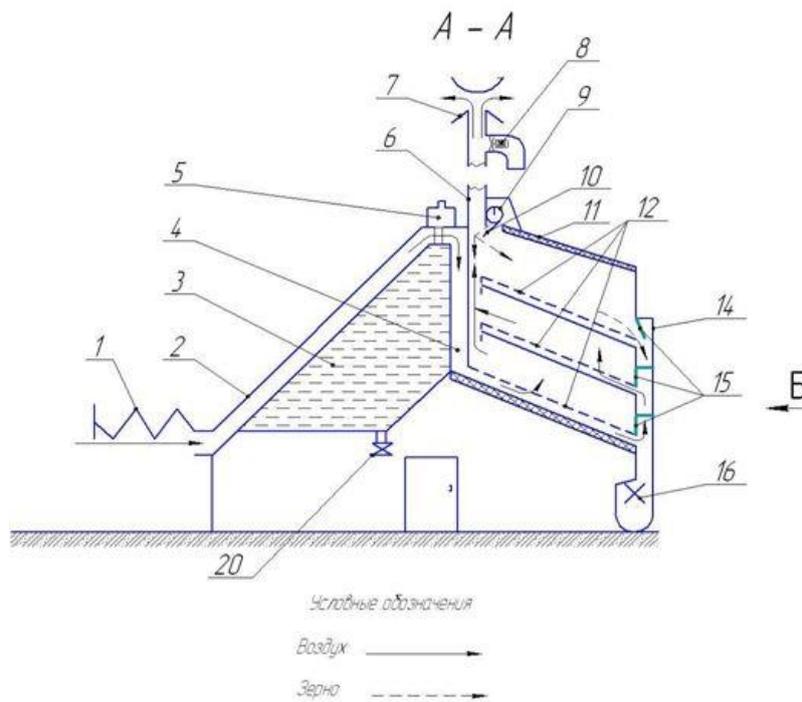
Дальнейшим развитием научных исследований в данном направлении должно явиться обоснование оптимальной высоты слоя зерна в хранилище данного типа, расстояния между воздухораспределительными каналами, системы регулирующих заслонок в каналах солнечных коллекторов.

Однако при данной конструкции гелиосушилки-зернохранилища не решен вопрос механизации загрузки и выгрузки зерна.

Решить поставленную задачу позволяет усовершенствованная схема гелиосушилки-зернохранилища, представленная на рис. 8.9 [24].

Гелиосушилка-зернохранилище (фиг. 1, 2, 3) содержит горизонтальный выдвижной пленочный солнечный коллектор 1 с зачерненным покрытием, наклонный солнечный коллектор 2 со светопрозрачным ограждением, водяной аккумулятор теплоты 3, основной воздушный канал 4, расширительный бачок 5, вытяжную трубу 6 в виде вертикального солнечного коллектора с дефлектором 7, вытяжной вентилятор 8, загрузочный транспортер 9 с направляющим лотком 10, сушильную камеру 11, перфорированные воздухораспределитель-

ные каналы 12 с задвижками 13, разгрузочные каналы 14 с заслонками 15, шлюзовой затвор 16, пневмотранспортер 17, поворотный дефлектор 18, циклон 19 и сливной кран 20.



фиг. 1

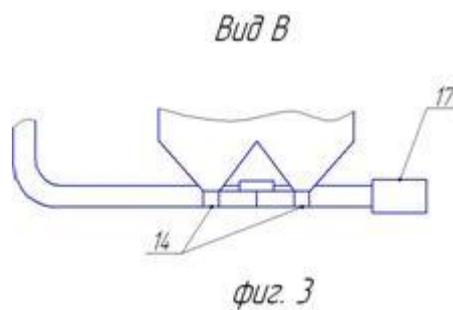
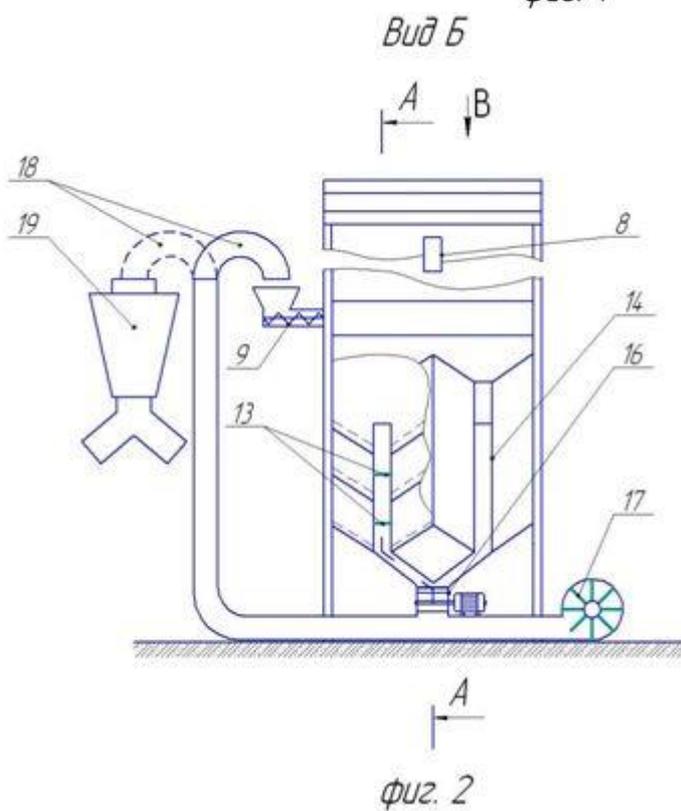


Рисунок 8.9 – Предлагаемая конструкция гелиосушилки-зернохранилища

Гелиосушилка-зернохранилище работает следующим образом. Материал, подлежащий сушке, посредством загрузочного транспортера 9 подается в сушильную камеру 11. Направляющий лоток 10 обеспечивает подачу материала в зазор между торцами перфорированных воздухораспределительных каналов 12 и стенкой вытяжной трубы 6, что приводит к последовательному равномерному распределению материала в сушильной камере на поверхностях перфорированных воздухораспределительных каналов 12. При этом заслонки 15 находятся в закрытом состоянии, препятствуя попаданию материала из сушильной камеры 11 в разгрузочные каналы 14.

Под действием солнечной энергии приточный атмосферный воздух (сушильный агент), последовательно проходя через выдвижной пленочный солнечный коллектор 1 с зачерненным покрытием и наклонный солнечный коллектор 2 со светопрозрачным ограждением, нагревается. Одновременно нагревается вода в водяном аккумуляторе теплоты 3. Далее сушильный агент поступает по основному воздушному каналу 4 и разгрузочным каналам 14 в перфорированные воздухораспределительные каналы 12 при открытых задвижках 13, проникает в слои высушиваемого материала, увлажняется и удаляется через вытяжную трубу 6 в атмосферу.

Задвижки 13 позволяют перекрывать подачу сушильного агента в соответствующие перфорированные воздухораспределительные каналы 12 при неполном заполнении сушильной камеры 11, что препятствует свободному выходу сушильного агента в вытяжную трубу 6, минуя слой материала.

При недостаточной тяге в вытяжной трубе 6 включается вытяжной вентилятор 8. Повышение величины нагрева сушильного агента и, соответственно, скорости сушки обеспечивается за счет увеличения площади тепловоспринимающей поверхности с помощью горизонтального выдвижного солнечного коллектора 1, а также регулирования количества воды в водяном аккумуляторе теплоты 3. При уменьшении объема воды в аккумуляторе больше солнечной энергии идет на нагрев сушильного агента, что увеличивает скорость сушки и наоборот. Максимальный объем воды в водяном аккумуляторе теплоты необходим для обеспечения сушки материала в ночное время. Заполнение водяного аккумулятора теплоты 3 производится через расширительный бачок 5, а опорожнение через сливной кран 20.

Для разгрузки высушенного материала открываются заслонки 15, материал под действием силы тяжести ссыпается в разгрузочные каналы 14 и далее через шлюзовой затвор 16 в пневмотранспортер 17, обеспечивающий с помощью поворотного дефлектора 18 подачу материала либо обратно в загрузочный транспортер 9, обеспечивая рециркуляцию материала, либо в разгрузочный циклон 19 и далее на переработку или постоянное хранение.

Как показали испытания прототипа гелиосушилки-зернохранилища наличие постоянной естественной тяги за счет вытяжной трубы обеспечивает сохранность влажного зерна даже при неблагоприятных погодных условиях.

Важным преимуществом является также возможность рециркуляции зерна в гелиосушилке-зернохранилище, что ускоряет сушку и обеспечивает ее равномерность для всей партии зерна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема энергосбережения в сельскохозяйственном производстве, возникшая в 70-х годах прошлого века, в настоящее время остается актуальной, в том числе, и для технологического процесса сушки зерна. Пока основным способом обеспечения длительного хранения зерна остается его сушка, эта проблема будет сохранять свою актуальность.

Основой зерносушильного комплекса остаются высокотемпературные сушилки различных типов, обеспечивающие высокую производительность, и используемые практически во всех климатических зонах производства зерновых культур.

Однако, как показала практика использования гелиоустановок в условиях Брянской области, они имеют большие перспективы применения для сушки семян овощных культур, зерна, лекарственных трав и другого сельскохозяйственного сырья.

Для повышения эффективности сушки барабанная гелиосушилка должна быть оснащена водяным аккумулятором теплоты, системами активной вентиляции и электроподогрева сушильного агента. Предложенная математическая модель обоснования параметров барабанной гелиосушилки зерна позволяет определить расчетные значения температуры нагрева зерна и времени его сушки с учетом интенсификации тепломассообменных процессов.

Водяной аккумулятор теплоты, системы активной вентиляции и электроподогрева сушильного агента обеспечивают стабильность процесса сушки при неустойчивых погодных условиях в дневное время суток, а также интенсификацию процесса сушки в ночное время.

Использование технологии досушивания зерна при его хранении в механизированных гелиосушилках-зернохранилищах позволит практически полностью отказаться от высокотемпературных сушилок. Однако еще требуются дополнительные исследования по определению их оптимальных конструктивно-технологических параметров.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Снижение энергозатрат в технологии сушки зерна	8
1.1. Технологические особенности качественной сушки зерна.....	8
1.2. Обзор конструкций гелиоустановок для сушки сельскохозяйственной продукции.....	13
1.3. Способы интенсификации тепломассообмена в процессе сушки зерна.....	28
Глава 2. Обоснование конструктивно-технологических параметров барабанной гелиосушилки зерна	32
2.1. Обоснование принципиальной схемы барабанной гелиосушилки.....	32
2.2. Определение требуемой площади гелиоколлекторов.....	35
2.3. Определение массы гравийного аккумулятора.....	41
2.4. Обоснование конструктивных параметров сушильного барабана.....	44
2.5. Обоснование конструктивных параметров и мощности привода барабана.....	47
2.6. Определение продолжительности процесса сушки.....	53
2.7. Критерий обоснования конструктивно-технологических параметров барабанной гелиосушилки зерна.....	57
Глава 3. Обоснование параметров водяного аккумулятора теплоты и систем активной вентиляции и электроподогрева сушильного агента барабанной гелиосушилки зерна	61
3.1. Обоснование параметров водяного аккумулятора теплоты барабанной гелиосушилки.....	61
3.2. Обоснование параметров систем активной вентиляции и электроподогрева сушильного агента барабанной гелиосушилки.....	63
3.3. Математическая модель барабанной гелиосушилки зерна с системами активной вентиляции и электроподогрева сушильного агента.....	66
Глава 4. Методика экспериментальных исследований барабанной гелиосушилки зерна	75
Глава 5. Результаты экспериментальных исследований барабанной гелиосушилки зерна	80
5.1. Характеристика климатических условий экспериментальных исследований.....	80
5.2. Характеристика зерновой массы как объекта сушки.....	83
5.3. Описание экспериментальной барабанной гелиосушилки зерна.....	86
5.4. Результаты экспериментальных исследований барабанной гелиосушилки.....	90
Глава 6. Результаты экспериментальных исследований барабанной гелиосушилки зерна с системами активной вентиляции и электроподогрева сушильного агента	119
6.1. Климатические условия экспериментальных исследований.....	119
6.2. Показатели зерновой массы как объекта сушки.....	122
6.3. Описание экспериментальной барабанной гелиосушилки зерна с системами активной вентиляции и электроподогрева сушильного агента.....	124
6.4. Результаты сравнительного испытания водяного и гравийного аккумуляторов теплоты барабанной гелиосушилки.....	126
6.5. Обоснование параметров систем электроподогрева и активной вентиляции сушильного агента барабанной гелиосушилки.....	130
Глава 7. Техничко-экономическая эффективность барабанной гелиосушилки зерна с водяным аккумулятором теплоты и системами активной вентиляции и электроподогрева сушильного агента	144
7.1. Критерий обоснования параметров барабанной гелиосушилки зерна.....	144
7.2. Экономическая эффективность барабанной гелиосушилки зерна с водяным аккумулятором теплоты, системами активной вентиляции и электроподогрева сушильного агента..	147
Глава 8. Технология досушивания зерна при хранении в гелиосушилке-зернохранилище	154
Заключение.....	163
Список использованной литературы	165

Список использованной литературы

1. Авдеев, А. В. Влияние влажности зерновых материалов на угол естественного откоса / А. В. Авдеев // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2004. - № 4. - С. 26-28.
2. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 443 с.
3. Алдошин, Н.В. Энергетическая оценка производства сена / Н. В. Алдошин, Д. М. Хомяков // Кормовые культуры. - 1989. - № 3. - С. 34.
4. Алейников, В. И. Послеуборочная обработка семян подсолнечника / В. И. Алейников. - М.: Колос, 1979. - 143 с.
5. Анискин, В. И. Технологические и технические решения проблемы сохранности зерна в сельском хозяйстве: дис ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / В. И. Анискин. – М., 1985. – 356 с.
6. Антипов, С. Т. Тепло- и массообмен при сушке в аппаратах с вращающимся барабаном / С. Т. Антипов, В. Я. Валуйский, В. Н. Меснянкин. – Воронеж: Изд-во Воронеж. гос.технол.акад., 2001. - 308 с.
7. Арапов, В. М. Критерий допустимых температурных режимов конвективной сушки пищевых продуктов / В. М. Арапов // Хранение и переработка сельхозсырья. - 2002. - № 11. - С. 23-26.
8. Арутюнов, Г. О. Совершенствование технологии сушки зерна на основе разработки конструктивно-технологических параметров зоны охлаждения зерносушилки бункерного типа непрерывного действия: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.01 / Г. О. Арутюнов. – М., 2003. - 161 с.
9. А. с. 1128072А СССР, F 26 В 3/28. Солнечная сушильная установка / Д. Мурадов, Г. Магтымов; патентообладатель Туркменский государственный педагогический институт им. В. И. Ленина (СССР). - № 785615; заявл. 12.04.83; опубл. 07.12.84, Бюл. № 45. - 3 с.
10. А. с. 1702132А1 СССР, F 26В 3/28. Гелиосушилка / В. А. Тихий (СССР). - № 1218038; заявл. 05.12.89; опубл. 30.12.91, Бюл. № 48. - 2 с.
11. А. с. 1778473А1 СССР, F 26В 3/28. Гелиосушилка / В. А. Тихий (СССР). - № 1370396; заявл. 19.10.90; опубл. 30.11.92, Бюл. № 44. - 3 с.
12. Атаназевич, В. И. Сушка зерна / В. И. Атаназевич. - М.: Лабиринт, 1997. - 256 с.
13. Атаназевич, В. И. Сушка пищевых продуктов: справочное пособие / В. И. Атаназевич. - М.: ДеЛи, 2000. - 296 с.
14. Аэродинамическая гелиосушилка для сыпучих материалов: а. с. 2002178 СССР: МПК F26В3/28 / А. К. Бровцын (СССР); заявл. 21.03.1991; опубл. 30.10.1993; Бюл. № 39-40. - 3 с.
15. Байдаков, Е. М. Возобновляемые источники энергии как основа высокоэффективных технологий / Е. М. Байдаков // Актуальные проблемы развития АПК: землеустройство, кадастры, геодезия, мониторинг и экономика: сб. статей - М.: Гос. ун-т по землеустройству, 2008. - С. 6-10.
16. Байдаков, Е. М. Использование возобновляемых источников энергии для сушки зерна / Е. М. Байдаков // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. - 2009. - № 7. - С. 32-35.

17. Барабанная гелиосушилка зерна: конструктивные параметры и эффективность использования / А. И. Купреенко, Х. М. Исаев, Е. М. Байдаков, А. Н. Ченин // Сборник 21 век: фундаментальная наука и технологии. – spc Academic. - 2014. – Т. 3. - С. 144 - 149.
18. Баум, А. Е. Сушка зерна / А. Е. Баум, В. А. Резчиков. - М.: Колос, 1983. - 223 с.
19. Безруких, П. П. Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии / П. П. Безруких, Д. С. Стребков. - М.: ГНУ ВИЭСХ, 2005. - 264 с.
20. Братерский, Ф. Д. Послеуборочная обработка зерна / Ф. Д. Братерский, С. В. Карabanов. - М.: Агропромиздат, 1986. - 175 с.
21. Буряков, Ю. П. Индустриальная технология возделывания подсолнечника / Б. П. Буряков. - М.: Высшая школа, 1983. - 171 с.
22. Введение в технологию промышленной сушки / пер. с англ. Р. Б. Кей. – Минск: Наука и техника, 1983. – 262 с.
23. Веселов, С. А. Проектирование вентиляционных установок предприятий по хранению и переработке зерна / С. А. Веселов. - М.: Колос, 1974. - 228 с.
24. Винокуров, К. В. Разработка технологического процесса и обоснования параметров барабанной зерносушилки с использованием эффекта рециркуляции зерна: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Винокуров, К. В. - Саратов, 2004. - 201 с.
25. Вобликов, Е. М. Технология хранения зерна / Е. М. Вобликов. - СПб.: Издательство «Лань», 2003. - 448 с.
26. Вобликов, Е. М. Послеуборочная обработка и хранение зерна / Е. М. Вобликов, Б. К. Маратов, А. С. Прокопцев. - Ростов н/Д: Издательский центр «МарТ», 2001. - 240 с.
27. Гатаулин, А. М. Система прикладных статистико-математических методов обработки экспериментальных данных в сельском хозяйстве / А. М. Гатаулин. - М.: Изд-во МСХА, 1992. - Ч. 2. - 192 с.
28. Гелиосушилка: пат. 2026518 Рос. Федерация: МПК F26B3/28 / Кулешов В. Н., Моксяков А. И., Филин С. А.; заявитель Кулешов В.Н., Моксяков А.И., Филин С.А., патентообладатель Моксяков А.И.; заявл. 13.10.1992; опубл. 09.01.1995.
29. Гелиосушилка: пат. 1276886 Рос. Федерация: МПК F26B3/28 / Церодзе А. В., Бибилейшвили В. И., Дабрундашвили З. Ш., Кикодзе Р. О., Гвачлиани В. В.; заявитель научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт плодоовощного хозяйства, научно-исследовательская лаборатория оборудования чайной промышленности научно-производственного объединения "Чай-пром"; заявл. 08.04.1985; опубл. 15.12.1986; Бюл. № 46. - 2 с.
30. Гелиосушилка: пат. 136141 Рос. Федерация: МПК F26B 3/28 (2006/01) / Купреенко А. И., Байдаков Е. М., Исаев Х. М., Ченин А. Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Брянская ГСХА; заявл. 25.06.2013; опубл. 27.12.2013. Бюл. № 36. - 2 с.
31. Гелиосушилка: пат. 159524 Рос. Федерация: МПК F26B 9/06 (2006/01), F26B 3/28 (2006/01) / Чащинов В. И., Купреенко А. И., Исаев Х. М., Байдаков Е. М., Ченин А. Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Брянский ГАУ; заявл. 05.08.2015; опубл. 10.02.2016. Бюл. № 4. - 2 с.

32. Гелиосушилка: пат. 71744 Рос. Федерация: МПК F26B 3/28 / Тихий В. А., Купреенко А. И., Байдаков Е. М., Исаев Х. М.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Брянская ГСХА; заявл. 30.07.2007; опубл. 20.03.2008, Бюл. № 8. - 2 с.
33. Гинзбург, А. С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности / А. С. Гинзбург. - М.: Агропромиздат, 1985. - 336 с.
34. Гинзбург, А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов / А. С. Гинзбург. - М.: Пищевая промышленность, 1973. - 528 с.
35. Гинзбург, А.С. Теплофизические характеристики пищевых продуктов / А.С. Гинзбург, М.А. Громов, Г.И. Красовская - М.: Пищевая промышленность, 1980. - 288 с.
36. Гинзбург, А. С. Теплофизические свойства зерна, муки и крупы / А. С. Гинзбург, М. А. Громов. - М.: Колос, 1984. - 486 с.
37. Гержой, А. Б. Зерносушение и зерносушилки / А. Б. Гержой, В. Ф. Самочетов. - М.: Колос, 1967. - 275 с.
38. Голубкович, А. В. Сушка высоковлажных семян и зерна / А. В. Голубкович, А. Г. Чижиков. - М.: Росагропромиздат, 1991. - 284 с.
39. Голубкович, А. В. Сушка высоковлажных семян и зерна / А. В. Голубкович, А. Г. Чижиков. - М.: Росагропромиздат, 1991. - 284 с.
40. Горбачев, И. В. Восьмая международная научно-техническая конференция «Энергообеспечение и энергосбережение и сельском хозяйстве» / И. В. Горбачев, Ю. Х. Шогенов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2012. - № 5. - С. 2-4.
41. ГОСТ 10987-76. Зерно. Метод определения стекловидности. - М.: Изд-во стандартов, 1976. - 5 с.
42. Данилов, О. Л. Теория и расчет сушильных установок / О. Л. Данилов. - М.: Изд-во МЭИ, 1972. - 72 с.
43. Демский, Н. В. Повышение эффективности процесса сушки зерна в шахтных зерносушилках: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Н. В. Демский. - Красноярск, 2008 - 153 с.
44. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта с основанием статистической обработки результатов исследований / Б. А. Доспехов. - М.: Агропромиздат, 1985. - 351 с.
45. Драганов, Б. Х. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве / Б. Х. Драганов, А. В. Кузнецов, С. П. Рудобашта. - М.: Агропромиздат, 1990. - 464 с.
46. Дьяченко, О. В. Материально-техническая база сельского хозяйства - основа развития аграрного сектора России (на примере Брянской области) / О. В. Дьяченко, С. А. Бельченко, И. Н. Белоус // Экономика сельскохозяйственных и перерабатывающих предприятий. - 2016. - № 6. - С. 27-31.
47. Егоров, Г. А. Влияние влажности на прочность пшеничной зерновки / Г. А. Егоров // Пищевая технология. - 1959. - № 5. - С. 17-19.
48. Егоров, Г. А. Влияние тепла и влаги на процессы переработки и хранения зерна / Г. А. Егоров. - М.: Колос, 1973. - 264 с.
49. Егоров, Г. А. Технологические свойства зерна / Г. А. Егоров. - М.: Агропромиздат, 1985. - 334 с.

50. Жидко, В. И. Зерносушение и зерносушилки / В. И. Жидко, В. А. Резчиков, В. С. Уколов. - М.: Колос, 1982. - 239 с.
51. Жидко, В. И. Лабораторный практикум по зерносушению / В. И. Жидко, В. И. Атаназевич. - М.: Колос, 1983. - 96 с.
52. Журавлёв, А. П. Технология сушки зерна и семян подсолнечника / А. П. Журавлёв, Л. А. Журавлёва. - Чапаевск, 2000. - 200 с.
53. Журавлёв, А. П. Теория и практика рециркуляционной сушки зерна / А. П. Журавлёв. - Самара, 2001. - 254 с.
54. Захарченко, И. В. Послеуборочная обработка семян в Нечерноземной зоне / И. В. Захарченко. – М.: Россельхозиздат, 1983. – 263 с.
55. Зерносушильный комплекс на основе альтернативного источника энергии / А. И. Купреенко, Х. М. Исаев, Е. М. Байдаков, А. Н. Ченин // Труды ГОСНИТИ. – М., 2015. - Т. 120. – С. 49-53.
56. Казаков, Е. Д. Биологические и физико-химические функции воды в зерне / Е. Д. Казаков // Влага в зерне. - М.: Колос, 1969. - С. 3-88.
57. Казаков, Е. Д. Биохимия зерна и продуктов его переработки / Е. Д. Казаков, Е. Д. Кавецкий, В. Л. Кретович. - М.: Колос, 1980. - 319 с.
58. Казаков, Е. Д. Методы оценки качества зерна. - М.: Агропромиздат, 1987. - 215 с.
59. Карпенко, А. Н. Сельскохозяйственные машины / А. Н. Карпенко, В. М. Халанский. - М.: Колос, 1983. - 495 с.
60. Карпенко, Г. В. Разработка и обоснование конструктивно-режимных параметров энергосберегающей установки для сушки зерна: дис. ... канд. техн. наук, 05.20.01 / Г. В. Карпенко. - Пенза, 2005 - 203 с.
61. К выбору теплоизоляции плоского гелиоколлектора / В. И. Чащинов, А. И. Купреенко, Х. М. Исаев, Е. М. Байдаков, О. В. Дьяченко // Вестник Брянской ГСХА. – 2011. - № 1. - С. 31-37.
62. Кожуховский, И. Е. Механизация очистки и сушки зерна / И. Е. Кожуховский. - М.: Колос, 1968. - 439 с.
63. Комышник, Л. Д. Сушка и хранение семян подсолнечника / Л. Д. Комышник, А. П. Журавлёв, Ф. М. Хасанова. - М.: ВО Агропромиздат, 1988. - 95 с.
64. К определению температуры нагрева объекта теплового воздействия в гелиоустановках / А. И. Купреенко, В. Ф. Комогорцев, Х. М. Исаев, А. Н. Ченин, Г. В. Шкуратов // Тракторы и сельхозмашины. - 2016. - № 3. – С. 20 - 22.
65. Коновалов, В. В. Практикум по обработке научных исследований с помощью ПЭВМ: учеб. пособие / В. В. Коновалов. - Пенза: ПГСХА, 2003. - 176 с.
66. Концепция "Обеспечение устойчивого развития агропромышленного производства в условиях техногенеза" / А. А. Жученко, Л. П. Кормановский, Е. И. Сизенко и др. – М., 2003.
67. Красников, Р. В. Кондуктивная сушка / Р. В. Красников. - М.: Энергия, 1973. - 288 с.
68. Кривоносов, А. И. Контроль качества зерна при хранении / А. И. Кривоносов, В. Я. Кауфман. - М.: Агропромиздат, 1989. - 62 с.
69. Кршеминский, В. С. Сушка семян и трав / В. С. Кршеминский, Н. Я. Попов. - М.: Колос, 1984. - 103 с.

70. Кулагин, М. С. Механизация послеуборочной обработки и хранения зерна семян / М. С. Кулагин, В. М. Соловьев, В. С. Желтов. - М.: Колос, 1979. - 256 с.

71. Купреенко, А. И. К снижению энергозатрат при сушке зерна / А. И. Купреенко, Х. М. Исаев, Е. М. Байдаков // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения: сб. науч. работ. - Брянск: Изд-во Брянская ГСХА, 2007. - С. 6-9.

72. Купреенко, А. И. К расчету необходимой площади гелиоколлектора барабанной зерносушилки / А. И. Купреенко, Х. М. Исаев, Е. М. Байдаков // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения: сб. науч. работ. - Брянск: Изд-во Брянская ГСХА, 2008. - С. 37-41.

73. Купреенко, А. И. К повышению эффективности гелиосушилок зерна / А. И. Купреенко, Х. М. Исаев, Е. М. Байдаков // Вестник Брянской ГСХА. - № 5. - 2009. - С. 63-68.

74. Купреенко, А. И. Результаты испытания барабанной гелиосушилки зерна / А. И. Купреенко, Х. М. Исаев, Е. М. Байдаков // Вестник Брянской ГСХА. - № 5. - 2009. - С. 69-73.

75. Купреенко, А.И. Барабанная гелиосушилка зерна / А.И. Купреенко, Х.М. Исаев, Е.М. Байдаков // Сельский механизатор, № 6, 2010. - С. 32-33.

76. Купреенко, А. И. К обоснованию конструкции зернохранилища со встроенной гелиосушильной системой / А. И. Купреенко, Х. М. Исаев, Е. М. Байдаков // Ресурсосберегающие технологии при хранении и переработки сельскохозяйственной продукции: материалы X Междунар. науч.-практ. семинара. - Орел: Изд. Орел ГАУ, 2010. - С.76-81.

77. Купреенко, А. И. К обоснованию конструктивных параметров сушильного барабана гелиосушилки зерна / А. И. Купреенко, Х. М. Исаев, Е. М. Байдаков // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения: сб. науч. работ. - Брянск: Изд-во Брянская ГСХА, 2012. - С. 7-10.

78. Купреенко, А. И. К определению продолжительности процесса сушки зерна в гелиосушилке / А. И. Купреенко, Х. М. Исаев, Е. М. Байдаков // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения: сб. науч. работ. - Брянск: Изд-во Брянская ГСХА, 2012. - С. 59-63.

79. Купреенко, А. И. К обоснованию площади коллекторов гелиосушилки / А. И. Купреенко, Х. М. Исаев, Е. М. Байдаков // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения: сб. науч. работ. - Брянск: Изд-во Брянская ГСХА, 2012. - С. 63-68.

80. Купреенко, А. И. К определению массы гравийного аккумулятора / А. И. Купреенко, Х. М. Исаев, Е. М. Байдаков // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения: сб. науч. работ. - Брянск: Изд-во Брянская ГСХА, 2012. - С. 68-70.

81. Купреенко, А. И. К обоснованию параметров барабанной гелиосушилки зерна / А. И. Купреенко, Х. М. Исаев, Е. М. Байдаков // Вестник ФГБОУ ВПО «Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. - 2012. - № 1 (52). - С. 48-51.

82. Курдюмов, В. И. Энергосберегающая установка для сушки зерна / В. И. Курдюмов, А. А. Павлушин // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. - 2007. - № 5. - С. 43-46.
83. Курочкин, А. А. Энергосберегающая зерносушилка контактного типа / А. А. Курочкин, А. Б. Терентьев, С. В. Чекайкин // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2014. – № 6 (22). – С. 197-200.
84. Лебедев, П. Д. Расчет и проектирование сушильных установок / П. Д. Лебедев. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. - 320 с.
85. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. - М.: Энергия, 1968. - 471 с.
86. Лыков, А. В. Тепломассообмен. Справочник. / А. В. Лыков. - М.: Энергия, 1978. - 479 с.
87. Малин, Н. И. Исследование процесса и разработка режимов охлаждения пшеницы при ее сушке в зерносушилках: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Н. И. Малин. – М., 1974. - 181 с.
88. Малин, Н. И. Справочник по сушке зерна / Н. И. Малин. - М.: Агропромиздат, 1986. - 160 с.
89. Малин, Н. И. Снижение энергозатрат на сушку зерна / Н. И. Малин. - М.: ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, 1991. - 54 с.
90. Мальтри, В. М. Сушильные установки сельскохозяйственного назначения / В. М. Мальтри, Э. Петке, Б. Шнайдер; пер. В. М. Комиссаров, Ю. Л. Фрегер; под ред. В. Г. Евдокимова. - М.: Машиностроение, 1979. - 525 с.
91. Мамеев, В. В. Состояние производства зерна озимых зерновых культур в Российской Федерации и Брянской области / В. В. Мамеев, В. Е. Ториков, И. В. Сычева // Вестник Брянской ГСХА. - 2016. - № 1 (53). - С. 3-9.
92. Мельник, Б. Е. Справочник по сушке и активному вентилированию зерна / Б. Е. Мельник, Н. И. Малин. - М.: Колос, 1980. - 175 с.
93. Надиров, Н. А. Энергосберегающая сушка семян зерновых культур в колхозах и совхозах с использованием солнечной энергии: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Н. А. Надиров. - М., 1987. – 179 с.
94. Обоснование теплоизоляции плоского гелиоколлектора / А. И. Купреенко, Х. М. Исаев, В. И. Чащинов, Е. М. Байдаков, О. В. Дьяченко // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения: сб. науч. работ. междунар. науч.-техн. конф. – Брянск: БГСХА, 2011. – С. 67-72.
95. Обработка и хранение зерна / пер. с нем. А. М. Мазурицкого; под ред. А. Е. Юкиша. - М.: Агропромиздат, 1985. - 320 с.
96. Омаров, Ш. К. Сортосые, агроэкологические и технологические особенности сушки винограда в Дагестане с использованием гелиосушилок: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.01, 06.01.07 / Ш. К. Омаров. - Махачкала, 2004 - 180 с.
97. Пат. 71744 Российская Федерация, МПК F 26B 3/28, Гелиосушилка / Купреенко А. И., Исаев Х. М., Байдаков Е. М.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО Брянская ГСХА. - № 2007129356/22; заявл. 30.07.2007; опубл. 20.03.2008, Бюл. № 8.
98. Пат. 92157 Российская Федерация, МПК F 26B 3/28, Гелиосушилка / Купреенко А. И., Тихий В. А., Исаев Х. М., Байдаков Е. М.; заявитель и патен-

тообладатель ФГОУ ВПО Брянская ГСХА. - № 2009135214/22; заявл. 21.09.2009; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 7.

99. Повышение эффективности тепловой обработки зерна / В. И. Курдюмов, А. А. Павлушин, К. В. Шлёнкин и др. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2012. - № 4. – С. 20-23.

100. Разработка барабанной гелиосушилки зерна и обоснование ее конструктивно-технологических параметров / Е. М. Байдаков, А. И. Купреенко, Х. М. Исаев, А. Н. Ченин // Технология колесных и гусеничных машин. – 2014. - № 6. - С. 10-16.

101. Растениеводство / Г. С. Посыпанов, В. Е. Долгодворов, Г. В. Коренев и др.; под ред. Г. С. Посыпанова. - М.: Колос, 1997. - 448 с.

102. Рекомендации по сушке семян сельскохозяйственных культур. - М.: Колос, 1965. - 48 с.

103. Романов, А. И. Практикум по оборудованию предприятий по хранению и переработке зерна / А. И. Романов, Е. П. Тихомиров. - М.: Колос, 1981. - 143 с.

104. Рудобашта, С. П. Расчет процессов сушки сельскохозяйственной продукции / С. П. Рудобашта. - М.: МИИСХП им. Горячкина, 1987. - 106 с.

105. Савченко, С. Термоустойчивость пшеницы при сушке / С. Савченко // Хлебопродукты. – 2007. - № 5.

106. Сажин, Б. С. Основы техники сушки / Б. С. Сажин. - М.: Химия, 1984. - 320 с.

107. Сажин, Б. С. Эксергетический метод в химической технологии / Б. С. Сажин, А. П. Булеков. - М.: Химия, 1984. - 320 с.

108. Сакун, В. А. Сушка и активное вентилирование зерна и зеленых кормов / В. А. Сакун. - М.: Колос, 1974. - 215 с.

109. Самочетов, В. Ф. Зерносушение / В. Ф. Самочетов, Г. А. Джорогян. - М.: Колос, 1970. - 287 с.

110. Севернев, М. М. Энергосберегающие технологии в сельскохозяйственном производстве / М. М. Севернев. - М.: Колос, 1992. - 190 с.

111. Скороваров, М. А. Режимы сушки зерна / М. А. Скороваров. - М.: Хлебиздат, 1959. - 66 с.

112. Скороходов, А. Н. Общая методика моделирования технологий и технических средств для их реализации по критериям энерго- и ресурсосбережения / А. Н. Скороходов // Вестник ФГОУ ВПО Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. - 2005. - № 4. - С. 56.

113. Совершенствование рециркуляционного способа сушки зерна / А. С. Гинзбург, В. А. Резчиков, Е. И. Никулин, О. Н. Каткова. - Серия «Элеваторная промышленность». - М.: ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1973. - 68 с.

114. Совершенствование сушки зерна пшеницы / А. П. Нечаев, В. Г. Байков, Н. А. Теребулина и др. - М.: ЦНИТЭИ Минзага СССР, 1980. - 30 с.

115. Солнечная сушильная установка: пат. 2118770 Рос. Федерация: МПК F26B3/28 / Ефремов Г. А., Минасбеков Д. А., Дацко С. А., Кушнер Б. И., Кочнев И. А., Смирнов А. С., С. Правин Кумар; заявитель научно-производственное объединение машиностроения, патентообладатель научно-производственное объединение машиностроения; заявл. 08.08.1996; опубл. 10.09.1998.

116. Технология переработки зерна / Я. Н. Куприц, Г. А. Егоров, М. Е. Гинзбург и др. - М.: Колос, 1977. - 326 с.
117. Товароведение зерна и продуктов его переработки / А. В. Мясникова, Ю. С. Ралль, Л. А. Трисвятский, И. С. Шатилов. - М.: Колос, 1971. - 400 с.
118. Ториков В. Е. Производство продукции растениеводства: учебник / В. Е. Ториков, О. В. Мельникова. - СПб, 2017.
119. Трисвятский, Л. А. Хранение зерна / Л. А. Трисвятский. - М.: Агропромиздат, 1986. - 351 с.
120. Туннельная сушилка: пат. 1170248 СССР: МПК F26B17/04 / Сасин В. С., Репшис А. П., Яденкус Р. И., Брагинский Ю. Л., Лотвинов М. Д.; заявитель центральный научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт по проектированию оборудования для целлюлозно-бумажной промышленности; заявл. 02.03.1984; опубл. 30.07.1985; Бюл. № 28. - 3 с.
121. Устройство для сушки различных материалов: пат. 2038554 Рос. Федерация: МПК F26B 3/28 / Ойнас Х.; заявитель и патентообладатель Ойнас Х; заявл. 04.07.1991; опубл. 27.06.1995.
122. Уравнение теплового баланса воздушного гелиоколлектора с аккумулятором теплоты / А. И. Купреенко, В. Ф. Комогорцев, Х. М. Исаев, А. Н. Ченин, Г. В. Шкуратов // Тракторы и сельхозмашины. - 2016. - № 4. – С. 33 – 36.
123. Федоренко, В. Ф. Ресурсосбережение в АПК: монография / В. Ф. Федоренко. – М., 2012. - 384 с.
124. Физико-механические свойства растений, почв и удобрений. Методы исследования, приборы, характеристики. - М.: Колос, 1970. - 422 с.
125. Физико-механические свойства сельскохозяйственных растений / М. Ф. Бурмистрова, Т. К. Комолькова, Н. В. Клемм и др. - М.: Сельхозгиз, 1956. - 343 с.
126. Фомин, Н. И. Повышение эффективности послеуборочной обработки зерна и обеспечение его сохранности: обзорная информация. Элеваторная пром-ть за рубежом / Н. И. Фомин, А. Н. Школьников, В. С. Турчинова. - ЦНИИТЭИ Хлебопродуктов. - М., 1998. - 38 с.
127. Харченко, Н. В. Индивидуальные солнечные установки / Н. В. Харченко. - М.: Энергоиздат, 1991. - 208 с.
128. Хранение зерна и зерновых продуктов / пер. с англ. В. И. Дашевского, Г. А. Закладного. - М.: Колос, 1978. - 472 с.
129. Шлыков, Ю. П. Контактный теплообмен / Ю. П. Шлыков, Е. А. Ганин. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. - 284 с.
130. Эккерт, Э. Р. Теория тепло и массообмена / Э. Р. Эккерт, Р. М. Дрейк. - М.-Л. Госэнергоиздат, 1961. - 520 с.
131. Экономическая эффективность механизации сельскохозяйственного производства / А. В. Шпилько, В. И. Драгайцев, Н. М. Морозов и др. - М.: 2001. - 346 с.
132. Энергосберегающие технологии и оборудование для сушки пищевого сырья / А. Н. Остриков, И. Т. Кретов, А. А. Шевцов, В. Е. Добромиров. - Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. технол. акад., 1998. - 344 с.

133. Юдаев, Н. В. Элеваторы, склады, зерносушилки: учеб. пособие. - СПб.: ГИОРД, 2008. - 128 с.
134. Юкиш, А. Е. Справочник по оборудованию элеваторов и складов / А. Е. Юкиш, Н. И. Рыбалка, И. Е. Селицкий. - М.: Колос, 1970. - 240 с.
135. European Commission (2000), Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council on the Promotion of Electricity from Renewable Energy Sources in the Internal Electricity Market, presented by the Commission (COM (2000) 279 final of 10.5.2000), Brussel.
136. IEA Wind Energy Annual Report. 2001, International Energy Agency (IEA) Executive Committee for the Implementing Agreement for Co-operation in the Research and Development of the Wind Turbine Systems, May 2002.
137. Frithjof Staip. Jahrbuch Erneuerbare Energieu 2000. Stitung Energieforschung Baden – Wurteinberg.
138. Henrik Lunberg, Michael Morris, Erik Rensfelt. Biomass gasification for Energy Production. The world directory of Renewable Energy Suppliers and Services, 1998. Jams and Jams, 1998. Pp. 75-82.
139. Kudra T., Mujumdar A.S. Advanced Drying Technologies. N. Y.: Marcel Dekker, Inc., 2002.
140. Mujumdar A.S. Role of IDS in Promoting Innovation and Global R&D Effort in Drying Technologies // Proceeding of the 16th International Drying Symposium (IDS 2004), 22-25 Aug. 2004 / - Brasil, 2004. – Vol. A. - P. 101-118.
141. Renewable Energy in India. Business Opportunities. Ministry of Non-Conventional Energy Sources, 2001. P. 111.
142. Strumillo C., Jones P.L., Zylla R. Energy Aspects in Drying. Handbook of Industrial Drying. 2nd Edition. A.S. Mujumdar (ed). – New York: Marcel Dekker, Inc. - 1995. – P. 1241-1276.
143. Wind Force 10. A blueprint to achieve 10 % of the world's electricity from wind power by 2020. EWEA, October, 1999. P. 54.

Научное издание

Купреенко Алексей Иванович,
Исаев Хафиз Мубариз-оглы, Ченин Алексей Николаевич

Применение гелиосушилок зерна
в условиях Брянской области:
теория и результаты

Монография

ISBN 978-5-88517-350-6



Редактор *Е.Н. Осипова*
Компьютерная верстка *А.И. Купреенко*

Подписано к печати 30.10. 2020 г. Формат 60x84. 1/16.
Бумага офсетная. Усл. п. л. 10,11 . Тираж 550 экз. Изд. № 6730.

Издательство Брянского государственного аграрного университета
243365, Брянская обл., Выгоничский район, с. Кокино, Брянский ГАУ